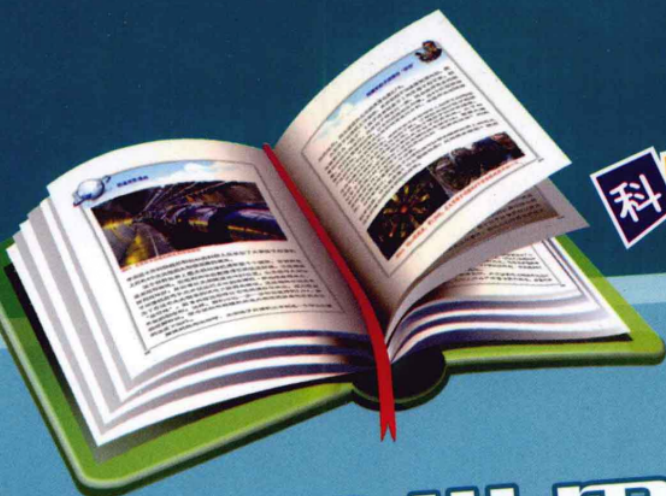


科技改变世界丛书

低温世界漫游



DIWEN SHIJIE MANYOU

总主编　杨光富
编　著　司有和



带你畅游科技世界



重庆大学出版社
http://www.cqup.com.cn

科技改变世界丛书

封面设计：程　晨



低温世界漫游



医护人员的火眼金睛



我爱这蓝色的海洋



嫦娥奔月不了情



激光的前世今生



地球在呼救



当煤和石油烧完了怎么办

ISBN 978-7-5624-4816-7



定价：18.00元

科技改变世界丛书

低温世界漫游

总主编　杨光富

编　著　司有和

重庆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

低温世界漫游/司有和编著.—重庆：重庆大学出版社，2009.7

（科技改变世界丛书）

ISBN 978-7-5624-4816-7

Ⅰ.低… Ⅱ.司… Ⅲ.低温物理学—少年读物 Ⅳ.051-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第037316号

科技改变世界丛书

低温世界漫游

总主编 杨光富

编 著 司有和

责任编辑:曾令维 版式设计:曾令维

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学（A区）内

邮编:400030

电话:（023）65102378 65105781

传真:（023）65103686 65105565

网址:http://www.cqup.com.cn

邮箱:fxk@cqup.com.cn（营销中心）

全国新华书店经销

四川省内江市兼升印务有限公司印刷

*

开本:940×1360 1/32 印张:7.375 字数:153千

2009年7月第1版 2009年7月第1次印刷

印数:1—19 000

ISBN 978-7-5624-4816-7 定价:18.00元

•序

科学的前世今生

历史沧桑，六千年文明，一脉相承，生生不息；五千年科学，上下求索，弦歌不绝。科学是承载文明的车轮，伴随人类走过千年历史的悠悠岁月。人类文明的历程，就是一部厚厚的科学史。

数千载来，人类创造了巨大的科学成就，这些成就的推广与应用，已成为推动现代生产力发展的最活跃的因素，极大地改变着人类的生产方式和生活质量，深刻地影响着人类社会的未来走向，改变并继续改变着世界的面貌。

建国60年来，尤其是改革开放30年来，从邓小平同志的“科学技术是第一生产力”的著名论断，到“科教兴国”战略，再到“科学发展观”，预示着一个空前规模和意义深远的科教新高潮正在到来。实施“科教兴国”和“科学发展”，要努力加速科技进步,提高国民的素质,特别是青少年。科学技术普及工作是科技工作的重要组成部分，科学知识、科学精神、科学思想和科学方法的普及已不仅仅是科学家的事，而需要全社会的共同参与。

追本溯源，神秘的科学世界是否真的艰深莫测，人类总耐以千寻。对渴望求知的人们来说，书籍便是他们探寻科学奥秘、解读科学知识的一个重要途径，但有些时候，那些晦涩的科学术语令他们望而却步，于是，科学便在大众心中落下一个曲高和寡的印象。

每个人都经历过年少，在那些懵懂的岁月里，我们总对神秘的科学世界抱有崇敬、好奇之心，我们常常会困惑怎么会有这么多（十万个）为什么？会感慨宇宙到底是个怎样的存在？那些神秘的UFO、海底怪物、未知的生物是否真的存在？那时，年少的我们便热切期待从那些既引人入胜又知识丰富的读物，来探究其中的奥秘。因此，编辑出版高质量的科普图书对于提高全民族，尤其是青少年的科技意识和科学素质，是很有必要，也很有意义的。

因合成世界上第一种类固醇口服避孕药而获得国家科学奖章的美国斯坦福大学化学教授卡尔·德杰拉西66岁那年作出决定，要全力投入科普事业。他说："我的作品不仅要拥有那些已经对科学感兴趣的公众，而且还要将那些一听到谈论科学就逃跑的公众也带进科学中来。要做到这些只有一种方法，就是讲故事"。

由此可见，如何让枯燥的科学知识更有趣，让科普图书更耐人品味，讲故事的能力是一个关键。"科技改

变世界丛书”力求用图文并茂的形式将故事娓娓道来，从立意、谋篇、开头、结尾等方方面面殚精竭虑，务求更加贴近读者。《低温世界漫游》揭秘的是“没有螺旋桨的潜水艇”“‘水’开了不冒气泡”……；《嫦娥奔月不了情》从“嫦娥奔月”的故事说起；《当煤和石油烧完了怎么办》畅谈节能减排和未来生存之道；《我爱这蓝色的海洋》探寻海洋的缘起……这套丛书力求做到：不局限于对科学知识的阐述，而是注重弘扬科学精神，宣传科学思想和科学方法；通俗易懂，引人入胜，集科学性、可读性、趣味性于一体。让本以为晦涩的知识被抽丝剥茧一样，一层一层在我们面前铺陈开来，简单、直接，却又趣味盎然；让人豁然开朗的科学知识，唤醒人们心中科学春天的萌芽，让科学不再神秘，真理也不再遥远，这是一个真诚而美好的愿景。

“科技改变世界丛书”也为我们搭建了一个很好的平台——解读科学的前世今生，再续文明数千载。在丛书出版之际，写了上面这些话，是为序。

杨光富

2009年7月

目录





引子

有谁见过：鲜嫩的花瓣、富有弹性的橡皮会一敲就碎？

有谁见过：铅皮做的小钟会敲得当当响？

没见过。在普通的环境里谁也没有见过。

有谁见过：“水”开了会不冒气泡？

有谁见过：“水”竟然会向高处流？

没见过。在普通的环境里谁也没有见过。

有谁知道：列车为什么会腾空而起，悬浮“飞”行？

有谁知道：导电的金属为什么居然会没有电阻？

不知道。通常的情况下，谁也不知道。

有谁知道：

什么样的潜水艇不用螺旋桨，

什么样的发电机不用装转子，

什么样的匣子可以装得了电，

什么样的线路输电可以实现零损耗，

什么样的容器能够盛装上亿度高温的物体？

不知道。通常的情况下，谁也不知道。

问得奇怪吗？一点不奇怪。因为低温物理学家会把我们引入另一个世界：在那里，这一切都是司空见惯的事实；在那里，这一切都可顺理成章、容易理解。

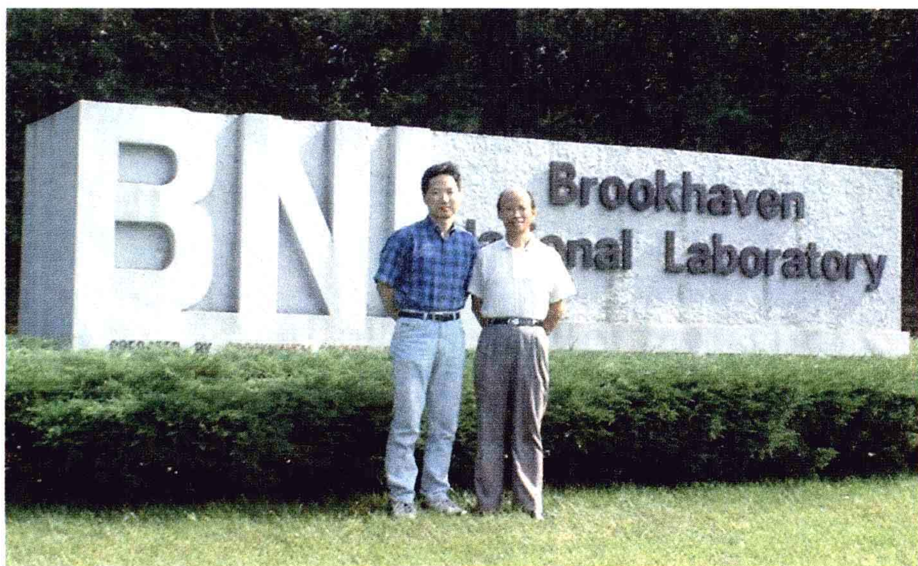
少年朋友们！赶快和我一起乘上这“林德号”专机，去漫游一下那魔术般的低温世界吧！

这是我在23年前写的一本科普书《低温世界》的开头引语。

1986年《低温世界》出版后，给当时正在高中二年级读书的15岁的儿子以很大的影响。当年9月，他考上了中国科学技术大



学第九届少年班。1991年，他在中国科技大学毕业后，被保送到中国科学院物理研究所作硕士、博士连读，他选择的是超导物理学方向。1997年到美国宾夕法尼亚州立大学物理系做博士后。现在，他已经是世界著名的布鲁克海汶国家实验室的研究员，继续从事超导研究工作。



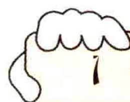
本书作者与儿子司卫东在美国布鲁克海汶国家实验室门口

2007年我去美国时，他跟我说："爸爸，如果不是你那本《低温世界》，我可能现在不会搞超导研究。"

这句话说得我非常欣慰。我心里想：科普书对于青少年选择奋斗方向的影响是存在的，而且影响力确实是很大的。

所以，在重庆大学出版社的大力支持下，我愿意将这本书修订再版。但愿有更多的青少年能够受本书的激励，选择并献身于低温物理学的方向！





1 低温世界在哪里

同学们，你们知道低温世界在哪里吗？也许你们会抢着说：我知道！我知道！然后七嘴八舌说开来。

有的说：“低温世界在重庆就能找到。数九寒天，北风呼啸。据记载，重庆最冷时，气温降到零下3.8摄氏度，那就是低温世界。”

有的说：“不。低温世界在东北大兴安岭，涛涛林海，茫茫雪原，一片白茫茫的世界，那才是低温世界呢。”

“不对，不对。黑龙江省呼玛县的漠河，号称北极村（如图1.1），1969年2月13日冷到了中国现有气象资料中的最低气温记录：零下52.3摄氏度，那才算得上是低温世界。”



图1.1 我国号称北极村的漠河，最低气温–52.3摄氏度





图1.2 南极风光，最低气温-89.2摄氏度

“那算什么低温世界！我爸爸从南极洲考察回来，告诉我，那里在夏天也是冰天雪地，冬天最冷的时候，是地球上最低温度的记录。那是俄罗斯南极东方站测得的零下89.2摄氏度（见图1.2）。那才称得上是地地道道的低温世界！”

到底谁说得对呢?

我说，都说对了，也都没有说对！

因为人们对于温度的认识，是从冷和热的感觉开始的。冷和热是相对的。为了比较和度量冷和热，人们发明了温度计。这才有了温度的概念。

比如，热水瓶里的开水是100摄氏度，是非常烫手的，可是和高达1 500摄氏度的熔化了的铁水相比，只能说是低温了。但是铁水的温度，和太阳表面的温度6 000摄氏度相比，也就低得多了。

可见，温度的高低是相对的。同学们所说的最低温度是相对的，重庆冬天的寒冷是相对于重庆地区来说的；漠河的零下52.3摄氏度，是中国境内的最低气温；而南极洲的零下89.2摄氏度，



那是地球上最低气温的纪录。因此，如果我们是相对于某一地区来谈最低气温，同学们说的就都是对的。

说同学们说得“不对”，是因为你们没有用共同的标准来进行比较，你们还不知道真正的低温世界在哪里。我们说的低温世界指的是低温物理学研究范围内的温度。在那个范围内，南极洲的零下89.2摄氏度也就算不上是低温了。

你看：变成了液体的甲烷，温度是零下162摄氏度；嫦娥仙子居住的广寒宫——月球，背着太阳的那一面，最冷的时候只有零下183摄氏度；而科学家把空气变成“水”之后，这液态空气的温度，就低到零下193摄氏度。在宇宙火箭的燃料箱里，那就更冷了，那里面装的是液态氢气，温度低到只有零下253摄氏度。

我国“神七”宇航员出舱在太空行走时，他们必须穿着那特制的“飞天”宇航服。那宇航服的众多功能之中就有一个保暖的功能，因为宇宙空间的温度是零下270摄氏度（图1.3）。

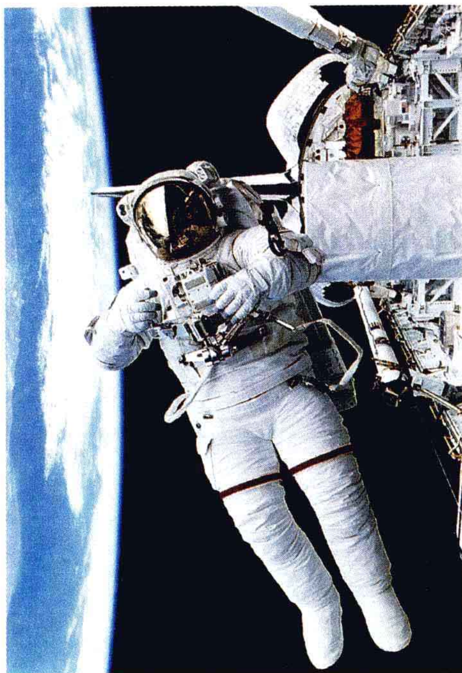


图1.3　2008年9月27日16时41分00秒，我国航天员翟志刚打开神舟七号轨道舱舱门，首次实施空间出舱活动。宇宙空间的温度为：-270摄氏度



……

不用再多举了。这些温度那才算是低温，这些地方才算是低温世界呐。

我想，这时大家是不是明白了，我说的低温世界是什么意思了吧。

有同学会说："明白倒是明白了，可是这温度这么低，温度的度数说起来好拗口，那些低温物理学家们在搞研究时也这么说吗？"

说得好。在低温世界里不像我们在上面说的那样来表述和记录温度，而是用另外一种温度标准，叫"热力学温标"。因为这个温度标示方法是英国物理学家开尔文首创提出的，所以人们又称它为"开氏温标"。

好多同学的家里都有温度计，同学们都见过。

在常用的家用温度计上，玻璃管内那红红的酒精柱两侧都标有刻度，一边标着字母"C"，另一边标着字母"F"。

标着字母"C"的称作摄氏温标，是瑞典科学家摄尔修斯在1742年制定的。他规定以水的冰点，即结冰时的温度为0度，以水的沸点，即水烧开时的温度为100度，写为：0 ℃和100 ℃。

标着字母"F"的叫华氏温标，是德国物理学家华兰海特在1714年制定的。他规定水的冰点为32度，水的沸点为212度，写作：32° F和212° F。

其实，在这两种温标中，作这样的规定，完全是人为的，并无理论根据。这两种温标都不适合在低温世界里使用。因为人们发现，温度没有高温极限，却存在着低温极限，而这低温



的极限才“绝对”的是零度温度，所以，应该以低温极限作为温度基准来建立温标。

怎样来确定基准温度呢？

1848年，英国物理学家威廉·汤姆逊·开尔文勋爵（图1.4）提出了一个办法，规定了一个新的温标。

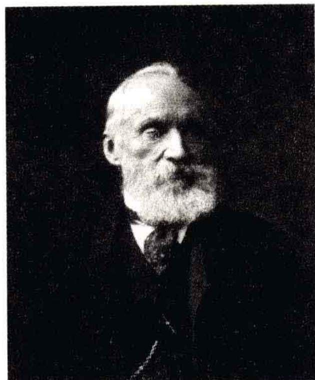


图1.4 威廉·汤姆逊·开尔文（1824—1907）

开尔文1824年生于爱尔兰，父亲占姆士是贝尔法斯特皇家学院的数学教授。他8岁时全家迁往苏格兰的格拉斯哥，占姆士则在格拉斯哥大学任教。开尔文10岁时就入读格拉斯哥大学，15岁时凭一篇题为《地球形状》的文章获得大学的金奖章。后来以全年级第二名的成绩毕业于剑桥大学。

1846年，开尔文回到格拉斯哥大学担任物理学教授，直到1899年退休为止。他是热力学的开创者之一。他利用卡诺循环建立的温标，以低温极限为零度温度，所以称为绝对温标。

他规定水的冰点为273.7度，水的沸点为373.7度。为了纪念他的贡献，绝对温度的单位以开尔文（Kelvin，K）来命名，写成273.7 K和373.7 K。读作二百七十三点七开和三百七十三点七开。

但是，低温物理学家们很快就发现这种规定“基准温度”的方法有一个缺陷：水的冰点和沸点的温度会随着压强的不同而发生变化。比如，海拔高度不同，水的沸点就不同：在海平面处，水的沸点是100摄氏度；而在3 000米的高山上，在90摄氏度时水就开了（图1.5）；如果到了17 000米的高空，37摄氏度水




图1.5　登山队员在高山上烧水，不到100摄氏度就开了

就沸腾了，恐怕连鸡蛋也煮不熟。可见，笼统地用水的沸点来定标是不准的。

于是，有人建议以海平面处的大气压条件下的水的沸点来定标。

但是，地球上各地点的纬度不同、气象条件不同，即使同是海平面，大气压也有差别。所以，用这种方法给温度定标，也不能保证温度测量的精确度，在各个国家之间也不能保证有统一的测温标准。

又经过了一个时期的努力，科学家们终于找到一个简单而十分精确的开氏温标定标法。这个办法是：

在一个密闭的没有空气的容器里，放着水、冰和水蒸气。在这里面，有多少冰化成水，就有多少水结成冰；有多少水化成汽，就有多少汽凝成水，就是说，水、冰、汽的量维持着动态平衡，三者平衡共存。科学家们称之为“三相共存”，将这时



的温度定为0.01摄氏度和273.16 K。

这种三相共存的温度叫做水的三相点。这是在1954年的国际度量衡会议和1960年第十一届国际计量大会上，全世界许多科学家共同商讨决定的。从此，就以水的三相点作为基准温度给开氏温标定点。

这个方法的好处是不受地理条件、气候条件的限制，不论你在哪个纬度的海平面，也不论你在海拔多高的山顶上，只要有密封很好的容器，而且里面是水、冰、汽三相共存，这个时候容器里的温度就是273.16 K。

这样就有了一个全世界各个国家都统一的温度标准了。以这时的温度为基点，按原来摄氏温标的间隔来标度，向上标到373.15 K，这是水的沸点；向下标到零度开，即0 K，这就是绝对温度。

在开氏温标中，在一个标准大气压下液态空气的温度是80 K，液态氢的温度是20 K，液态氦的温度是4.2 K。这样说起来、写起来都很顺口、方便。

说到这里我们对低温世界就有了一个准确、科学的概念了。低温物理学研究的温度范围是120 K到0 K。

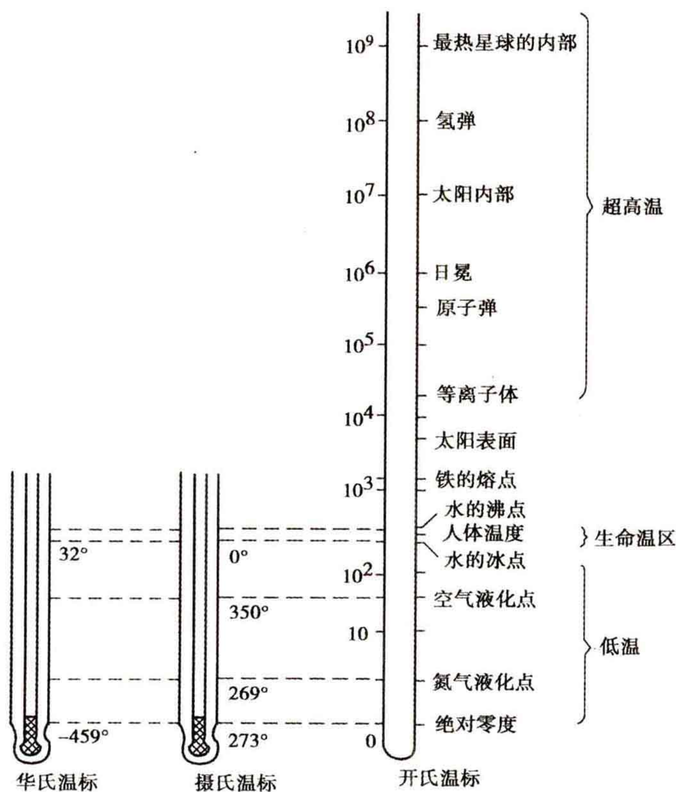
国际制冷学会（IIR）的温区划分标准

温度范围	温区名称
273.16 K > T > 120 K	冷冻温区
120 K > T > 0.3 K	低温温区
0.3 K > T > 0 K	超低温温区



此外，国际制冷学会（IIR）在1971年关于零摄氏度以下温区的划分有一个标准，并建议各个国家按此执行。

在120 K到0 K的低温世界里，物质表现出许许多多平常所没有的、在本书“引子”中提到的那些特别的性质，会产生出许多千奇百怪的现象，简直是令人眼花缭乱，目不暇接。



华氏温标、摄氏温标和开氏温标的比较



2 魔术般的低温世界

要想漫游魔术般的低温世界，可以到中国科学院低温物理研究所去参观。

在低温物理研究所，接待我们的是张岩教授。他首先给我们讲了英国化学家拉姆赛最初发现低温下物质表现出奇怪现象的故事：

1898年5月24日，英国化学家拉姆赛收到发明家汉普森送来的750立方厘米的液态空气。当时，要液化空气是很困难的事，全世界只有几个实验室能够液化空气。其中就有伦敦的杜瓦实验室，但杜瓦对外保密液化方法，也不肯为别人提供液态空气。



图2.1　威廉·拉姆赛（1852—1916）

后来不久，汉普森也发明了液化空气的方法，还办了工厂专门生产液态空气。他是拉姆赛的好朋友，也住在伦敦，当他知道拉姆赛需要液态空气做试验，就给拉姆赛送来了。

拉姆赛（图2.1），英国化学家，1852年出生于英国苏格兰的格拉斯哥。他从小就兴趣广泛、聪颖好学。有一次，他踢足



球不小心把脚踝骨弄伤了，躺在医院里痛得“哇哇”直叫。他妈妈随手拿了一本怎样做焰火的小册子给他看。他看着看着，渐渐地入了迷，居然忘了疼痛。伤愈后，拉姆赛还惦记着那本小书中展现的丰富多彩、变化莫测的奇异世界，他暗下决心，长大后一定要当化学家，去揭开世界的秘密。

“有志者，事竟成”。1866年，拉姆赛以优异的成绩从格拉斯哥大学毕业，1870年获得德国海德堡大学的博士学位。1888年被选为英国皇家学会会员。他与物理学家瑞利等合作，发现了氦、氖、氩、氪、氙和氡六种惰性气体，这在世界化学史上是绝无仅有的，被称之为“惰性元素之父”。1904年他获得了诺贝尔化学奖。

那一天，拉姆赛接过汉普森送来的液态空气，满心喜悦，只见瓶内的液态空气像纯净的蒸馏水一样，清澈透明，慢慢地向上冒着小气泡。拉姆赛轻轻摇动了一下杜瓦瓶（盛放液态空气的瓶子），里面的液态空气像水一样地晃荡着，气泡冒得多一些，并且“吱吱——”地发出响声。

拉姆赛接到液态空气后接连做了好几个试验：首先，他将装有小半管水银、中间插了根细铁棒的试管放在液态空气中浸了浸，结果水银冻结了。他将小铁棒向上一拔，连棒带水银一道拔了出来，成了一把水银锤子。拉姆赛顺手拿起一根铁钉，就用水银锤子把钉子钉在墙上。想不到水银会变得这么硬。

拉姆赛又把一块面包放进了液态空气，出乎意料，取出来的面包在黑暗中发出天蓝色的光泽。



这时，张教授说：“拉姆赛接着又拿起一枝月季花插进液态空气里，同学们，你们说月季花会变成什么样？”

一位同学说：“一定会变成一个月季花锤子，发出天蓝色的光。”

“真的？”张教授看着刚才说话的同学，接着说：“不见得！你们不相信，我们来直接做一下拉姆赛的实验，看看是什么结果。”张教授一边说，一边拿起放在桌上的一枝鲜艳的月季花，在手中摇了摇，柔软的花枝不停地晃动着，并将花儿伸到一个同学的鼻子底下，问：“怎么样？香不香？”

“香！是真花！”那个同学说。

张教授缓缓地把月季花放进一个大口的保温瓶里，再盖好盖子，并把保温瓶外面贴的一个标签向大家展示了一下，上面写着：“液氦 4.2 K”。

过了一会，张教授小心翼翼地把月季花取了出来，只轻轻地一摇，花瓣全部散落在桌面上了，一个同学轻轻地碰了一下落在桌面上的花瓣，花瓣立即碎成许多小块。

大伙莫名其妙。张教授说：“你们看，这是什么？”

“皮球。”同学们异口同声地回答。

“对，是皮球。皮球能拍，对不对？”这一次，没有人回答，却轰地一声都笑了起来。因为大家觉得，张教授把我们当成幼儿园的小朋友了。张教授在桌上轻轻拍了几下皮球，又拿出一根柔软的细管子，问：“这是什么？”

“这像我妈妈上班时用的听诊器上的橡皮管。”有一位小同学怯生生地说。



“对。就是那玩意儿。不过，这不是橡皮的，是乳胶管。”说着，张教授一边把皮球放进刚才泡月季花的那个盛着液氦的大口保温瓶里，一边把乳胶管放进了第二个大口保温瓶里。瓶上的标签写着：“液氮 77 K”。

没过一会儿，张教授拿出那根乳胶管，对两个同学说：“这个管子冻弯了，你俩把它拉直。” 两个同学一个人拉着乳胶管的一头，奇怪，那么柔软的乳胶管这个时候竟然拉不直。稍一使劲，乳胶管给拉断了。两个同学莫名其妙地看着张教授：“这是怎么回事？”

张教授没有回答，却问：“你们猜猜，皮球会怎么样？”

“不知道。”同学们不敢回答，但是有一个同学小声地说：“也会碎了？”

“对。”张教授从大口保温瓶中取出皮球来，小心地递给那个小声说话的同学。那位同学伸手接过皮球，一不小心掉在地上，皮球碎成了许多片。

大家惊得目瞪口呆。张教授说，在低温世界里，不仅鲜花、



图2.2　2008年10月20日，中国第25次南极科考队举行出征仪式，极地科考船“雪龙”号解缆出征



乳胶管和橡皮会一碰就碎，就是金属也是如此，在低温下金属会变得很脆。

接着，张教授又讲了一个故事：现在，去南极考察的国家很多。中国已经是去第25次了（图2.2）。

“知道第一个到达南极的人是谁吗？”张教授问。

“不知道。”

“听说是挪威人阿蒙森。”有同学说。



图2.3 英国著名南极探险家罗伯特·福尔肯·斯科特

“对。”张教授说：“还有一个英国人，叫斯科特，比阿蒙森晚了一个月（图2.3）。可是，在南极的低温下，金属变脆，给了斯科特一行五人以致命打击，使他们最后命丧南极。”

同学们大吃一惊，瞪大着眼睛听张教授讲。

那是1912年的1月3日，英国著名探险家、海军上校罗伯特·福尔肯·斯科特率领他的四名队友开始从南极宿营基地向南极点出发。

可是，一个月过去了，两个月过去了，一直杳无音信。直到1912年11月，一支搜寻队发现了他们的尸体和一本日记，日记一直记到3月29日他们离开人世的最后一天。

这时，人们才知道，他们是1月17日到达南极点的。可是，这时他们发现，这里已经插着挪威国旗，看到了他的竞争对手



阿蒙森丢弃的帐篷。他们感到这是从来没有过的沉重打击。更没有想到的是，天有不测风云，1912年3月的南极，比哪一年的3月都冷，很长时间都在零下37摄氏度。就在他们历经千辛万苦返回第一个补给站时，发现储藏库里的煤油桶都开裂了，煤油已经不翼而飞。没有煤油就无法取暖，也无法烧东西吃。好不容易克服千难万险，又找到了第二个补给站，可是储藏库里的煤油桶同样是空空的，铁桶同样有裂缝，显然煤油都是由于铁桶漏了而流失掉的。结果，他们最后被冻死在离宿营基地只有几公里的地方。

那么，煤油桶为什么会开裂呢？科学家们经过反复研究终于发现了其中的缘由，原来盛煤油的铁桶是用白锡焊的。白锡在零下13.2摄氏度以上时是坚固和稳定的。如果气温降到零下13.2摄氏度以下时就变成灰锡，锡金属的边缘就会分崩离析。如果温度急剧下降到零下33摄氏度时就会产生“锡瘟”，晶体锡就会变成粉末锡。白锡一变成粉末，煤油就顺着缝隙流出来了。

张教授说，低温使白锡变灰锡、粉末锡造成重大事故不只是发生这一起。

1812年，拿破仑远征俄国（图2.4），最后兵败俄国的主要因素，就是拿破仑征俄大军的制服都是锡制纽扣，在寒冷的气候中，锡制纽扣变成粉末，衣服上没有了纽扣，数十万拿破仑大军在寒风暴雪中形同敞胸露怀，许多人被活活冻死，还有一些人因冻得病而死。

还有，1867年的冬天，俄国彼得堡十分寒冷，达到零下38摄氏度。这一年冬天俄国彼得堡海军仓库里发生了一件怪事：



堆在仓库内的大批锡砖，一夜之间突然不翼而飞，留下来的却是一堆堆像泥土一样的灰色粉末。从仓库里取出军大衣来，发给俄国士兵穿时，发现纽扣都不见了，再仔细看看，原来纽扣处也有着一些灰色粉末。

不只是白锡会如此，钢材也会发生脆化。第二次世界大战前期，用普通钢材造的军舰在北冰洋和北大西洋中航行或作战时，就因低温而使普通钢发生脆化，以致发生灾难性事故，而且也不止一两起。

这时，张教授拿出一个钢丝弹簧，挂在架子上，再在弹簧下端挂上标有重量的铁块。先是挂了十千克，接着又挂上十千克，再加五千克，弹簧伸长了一截。张教授用尺子量了量，说："大家看清楚没有，现在挂了二十五千克铁块，弹簧现在



图2.4　1812年拿破仑远征俄国（油画）



长二十厘米。”说完之后，张教授把弹簧放入第三个大口保温瓶，盖好盖子。保温瓶外面的标签上写着：

“液态空气 80 K”。

“让它泡一泡。” 张教授一边说，一边提起放在桌上的一只小钟，说：“这是用铅皮做的。”并用金属棒敲了两下，只听到“嗬、嗬……”响了几下闷闷的声音，然后就把铅皮小钟放到装有液氮的第二个大口保温瓶里泡着。

张教授问：“你们说，我把铅皮小钟取出来再敲，会有什么结果？”

“敲得粉碎。”大伙齐声回答。

“为什么？”张教授反问。

“金属在低温下会变脆。”一个精明的同学马上解释。

“不一定。”过了一会，张教授取出铅皮小钟，用金属棒敲了起来，奇怪：小钟不仅没有碎，反而发出“铛，铛……”的清脆响声。

这声音把大伙弄得更是莫名其妙了。张教授说：“不是所有的金属材料在低温下都会变脆，有的材料在低温下会增加原来的强度。例如：不锈钢、铜、铝和某些合金。你们来看看这根弹簧。”张教授取出弹簧，又挂在原先挂的架子上，再往上加标有重量的铁块：二十五千克，三十五千克，四十五千克，直到五十千克了，弹簧才伸长到二十厘米。

“这可就怪了，”一个同学说：“这弹簧变得厉害了！”

“是啊，它的抗拉能力增加了一倍。”张教授说：“世界上的事物是复杂的，是多种多样的，我们在学习时不要千篇一



律，墨守成规，一切要从客观实际出发，不能凭主观想象。”

同学们为眼前所看到的现象迷住了，终于忍不住问：“张老师，到底是什么原因造成这完全不同的现象？”

张教授说：“这里的原因，有的已经搞明白了，有的还没有搞明白。搞明白的，就是《低温物理学》所说的内容，将来你们到大学，如果学习低温物理专业，就有可能会明白其中的道理。至于那些科学家们还没有搞明白的地方，恐怕就要等你们长大之后去解决了。好了，这里不上课，再看下面的。”

“下面看什么？”

“看水开了不冒气泡。”

同学们一听，噗嗤地笑了起来。



3 “水”开了不冒气泡

同学们的心情异常兴奋，大伙七嘴八舌地议论着：“水开了，怎么会不冒气泡”，“老师在物理课上讲过，水开了叫‘沸腾’，上下翻滚，直冒气泡，碰都不敢碰，唯恐烫了，哪有不冒气泡的呢？”

张教授领着大伙儿走出刚才的实验室，来到另一间实验室：“液氦研究室”。这是一个现代化的研究室兼实验室，许多实验要在超低温下进行，必须隔着密封的有机玻璃柜进行遥控操作。

张教授说：“你们看，那个大烧瓶。”同学们顺着张教授手指的方向，朝着一个密封的、真空绝热的有机玻璃柜看去，只见里面有一个大烧瓶，盛满了透明的“水”。玻璃柜上方的一排仪表中有一个温度表，表上指示的温度为4.2 K，如果是水的话，早就结成冰了，肯定不是水。那么，那是什么液体呢？

只见烧瓶里直冒气泡，就好像是水烧开了一样，可是烧瓶底下并没有火，倒像是汽水瓶刚刚打开时一样，不断地冒着细细的小气泡。

张教授说：“烧瓶里装的不是水，是液态氦，就是已经变成液态的惰性气体氦气。不断地冒气泡，说明烧瓶里的液体处在沸腾状态。你们知道液体沸腾时为什么会冒气泡吗？”

“物理课上老师讲过，因为液体受热不均匀，下部的液体受



热变成了气体，上部还是液体，气体要冒出来，就形成为我们看到的气泡。”

“回答正确。那冒出来的就是氦气。你们注意，我现在给它降低温度。”

过了一会儿，烧瓶里的气泡越来越少，最后没有了，液氦如同水晶一般地晶莹剔透，一动不动。这时温度表上指示的温度是：“2.18 K”。

张教授问：“液氦还在沸腾、蒸发吗？”

“没有，温度下降，液氦已经变成固体了，结成氦冰了。”

“嗯？”张教授操纵着烧瓶晃了晃，液面明显地在晃动。

“没有凝固？那是饱和蒸汽了？”一个同学回答。

张教授对于同学们肯动脑筋回答问题很高兴。他从办公桌上拿来一本书，翻到一页，说：“你们看，液氦在2.18 K时的饱和蒸汽压是38 550.2帕，你们看这个气压表上的数字，还没有到这个数值。”张教授顿了顿说：“看来，液氦还在蒸发，对不对？”

“还在蒸发，为什么不冒气泡？……”有一个同学一边思索，一边自言自语地说：“这是不是表明在这个温度下，液氦的传热能力特别强，液体内部没有受热不均匀的现象，蒸发是在液体表面进行？不，不可能。”

“为什么不可能？”张教授兴高采烈地接上去说：“在一般情况下，一般液体是不可能出现这种情况，但是在特殊的、超低温的情况下就是可能的了。我们看到的就是这种特殊情况。这时液氦内部的热传导特别快，不存在受热不均匀的问题，蒸发就在液氦表面进行。低温物理学家称这种性质叫液氦的‘超导热性’。”



同学们佩服地朝刚才回答的那个同学看了看，张教授继续说："不是所有的液氦都具有超导热性。我们现在看到的是又一种液氦。在低温物理学里，把前一种冒泡的液氦叫做氦Ⅰ，把后一种静止的、不冒泡的液氦叫做氦Ⅱ。"

"我知道，还有氦3、氦4。"有个同学抢着说。

张教授友善地笑了笑："小同学，它们不是一回事。氦3、氦4是氦的同位素，氦Ⅰ、氦Ⅱ是指不同温度下的液态氦。"

张教授一边说，一边操纵着机械手拿起一个烧杯，并把烧杯口朝向同学们这一边，问："你们看一看，烧杯底上有没有一个洞？"

"洞？"大伙一听，连忙伸着脖子去看，但是都没有说话，因为大家都没有看到有孔。张教授移过来一台放大镜，大伙从放大镜里确实看到有一个小孔。

"这个小孔的直径只有0.000 01厘米，只有头发丝的十分之一粗，所以不容易看得出来。我现在向烧杯里倒了一点液氦。你们说，这是氦Ⅰ，还是氦Ⅱ？"

"是氦Ⅰ，因为这温度表上显示的温度是4.2 K。"

"对。可是，这有洞的烧杯，为什么不漏？"张教授进一步启发同学。

"孔太小了，漏不下来。"一个同学回答。

"不，是表面张力的原因，是液体具有粘滞性。"有一个同学说。

"对。这么细的孔，再加上液体由于表面张力产生的粘滞性，所以没有漏出来。不过，当温度下降，氦Ⅰ变成氦Ⅱ之



后，情况就不一样了。”

说着，张教授调整温度旋钮，温度表显示的有机玻璃柜里的温度在缓慢下降，当温度刚刚到达2 K时，只见烧杯里的液氦奇迹般地从底部的小孔里往下箭一般地射了出来。

“咦！”同学们不由得惊叫起来。

“还有更奇怪的呢！”张教授又用机械手取来一只奇特的容器，两个大小不同的烧杯，中间连接在一起。连接的那部分是干什么的呢？

“你们说，连接两个烧杯的是一个玻璃棒、还是一个玻璃管？”

“？”大伙确实看不清楚，所以谁也没有贸然回答。

只见张教授又遥控机械手向左边的那个稍高一点的烧杯里倒了一杯液氦。这时，大家看得清清楚楚，液氦没有流到右边的烧杯里。有一个嘴快的同学说：“不通，那是一个玻璃棒。”

“真的？”张教授调节温度旋钮，当调到2 K时，只见液氦竟然从那个“玻璃棒”中射向右边的烧杯（图3.1）。

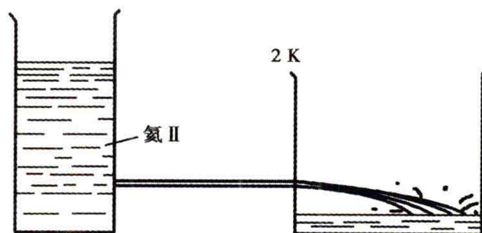


图3.1　氦 II 的超流动性实验



“哇！”同学们欢呼起来。只见液氦一直流到两液氦面相平时为止。这就是物理课上讲的连通器现象。

张教授说，前面从杯子底下漏出来，和这里的从侧面流出来，这两个现象是一个道理。科学家们做了很多次试验，发现氦Ⅱ可以流过毛细管，可以流过两块光学抛光的玻璃表面合在一起形成的狭缝，而不呈现出任何黏滞性，速度可达每秒几厘米。进一步的实验研究，证实氦Ⅱ的黏度等于零。

真可以说，氦Ⅱ没有过不去的孔，没有过不去的缝隙。而且，孔越细，它流得越快。在低温物理学中，这种性质叫做“超流动性”。

液氦的超流动性是前苏联物理学家卡皮察（图3.2）在1938年发现的。后来，他曾到英国剑桥，在由著名物理学家卢瑟福主持的卡文迪许实验室工作了13年，回国后，苏联政府专门为

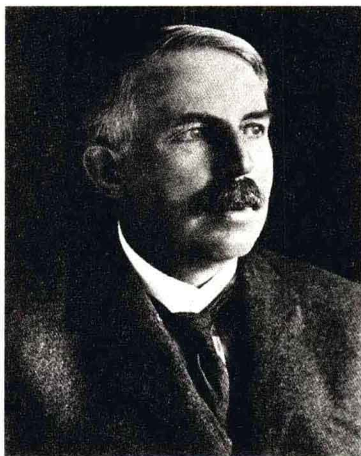


图3.2　卢瑟福





图3.3　卡皮察工作过的地方：卢瑟福主持的卡文迪许实验室

他建立了苏联国家科学院物理研究所，由他任所长。他为苏联物理学的发展做了大量的工作。由于在低温物理学中所作的重大贡献，卡皮察在1978年获得诺贝尔物理学奖。

正在大家为卡皮察的贡献惊叹不已之时，实验室告示牌上出现了五个字：

“‘水’往高处流”。

4 “水”往高处流

“水，总是向低处流。这里给‘水’是打着引号的，一定不是水。”

张教授听了，夸奖同学们善于思考，说：“是的。这里所说的水，确实不是平常我们所说的水。平常所说的水，在低温王国里早已冻得如同坚硬的岩石。不过，我们说它是水，是因为它和水属于同一类，都是液体，所以都能流。”

“哈哈，液体怎么会向高处流呢？”同学们不相信，一定要看个究竟。

只见张教授带大家来到另一个实验台，看到有机玻璃柜里有一个大玻璃缸，玻璃缸侧面写着“液氦池”三个字，温度表上指示的温度是2 K，就是说液氦池里盛放的是氦Ⅱ。张教授用机械手将一只烧杯放入液氦池中。烧杯口在液氦面之上，烧杯里空空如也。可是，很快大家就发现，烧杯里竟然出现了液体，当然那液体只能是氦Ⅱ，清清楚楚，一点不假，并且液面还在缓缓地上升，一直到杯里杯外的液面相平时为止。

张教授又用机械手把烧杯往上提了一些。这时，烧杯里的液面比液氦池里的液面要高一点。结果，怪事又发生了，烧杯里的液面开始下降，而且越降越少，直到杯里杯外的液面相平时为止。



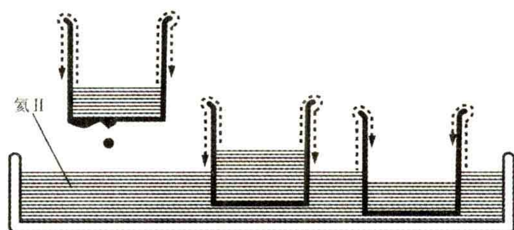


图4.1 氦Ⅱ的超流动性（爬移效应）实验

“咦，奇怪！”许多同学都瞪大眼睛看着。只见机械手把液氦烧杯完全提出液面。结果，更加奇怪的事出现了：烧杯里的液面继续下降，不一会烧杯的底部出现了液滴，液滴越来越大，大得往下滴，滴回到液氦池里。滴啊，滴啊，直到烧杯里的氦Ⅱ全部滴完为止（图4.1）。

一双双眼睛看着有机玻璃柜里发生的奇怪现象，不由得叽叽喳喳地议论起来。有人说：“烧杯底部可能有一个我们看不见的小孔。”

张教授把烧杯移到放大镜下，同学们看了好一会儿也没有发现有小孔。

另一个同学说：“甭看了。如果真是有孔的话，就会和刚才做的那个实验一样，氦Ⅱ会从下面射出来，而不是一滴一滴地滴出来。”

“是啊！”大家附和着。

“没有洞，那氦Ⅱ是怎么进去的呢？总不能说是从杯口上面翻过去的吧！”那个同学不服气地辩解。

大伙都不出声了，一起把目光投向张教授。

张教授说：“为什么不可能从上面杯口翻过去呢？氦Ⅱ就



有这个特性，能往高处流。大家看到的，氦Ⅱ‘水’，从外到里，从里到外，都是从烧杯口上面翻越过去的。氦Ⅱ总是要向所能达到的最低的液面积聚，哪怕是越过“万水千山”也在所不辞。上面的三种情况都是如此。为了达到最低的液面，氦Ⅱ先是沿着杯壁向上爬，一直爬到杯口，越过杯口，再顺着杯壁向下爬。低温物理学家称这种现象叫做氦Ⅱ的爬移效应。它是氦Ⅱ的超流动性的一种表现。”

“那我们怎么看不见它在爬？”

“因为液氦均匀地分布在全部杯壁上，而且是薄薄的一层氦Ⅱ膜，很薄很薄，肉眼是看不到的。所以，爬移效应又被称作爬行膜现象。”

同学们听了之后，不禁为低温王国里这奇妙的现象所吸引，连忙问：“张教授，还有什么奇妙的现象吗？”

“有。氦Ⅱ还有一个令人叹为观止的现象。我只要用手电筒光这么一照，就可以让氦Ⅱ从低处喷到高处去。” 张教授说罢，就移动机械手，取出一个玻璃管，外形像是一个没有底的酒瓶，只是上端那“瓶颈”部分很细很细。张教授把瓶颈朝下，从没有底的下部往瓶里装了许多黑色的金刚石细粉末，大约装了大半瓶，再用棉花松松地塞住下口，然后瓶颈朝上地放入盛放着氦Ⅱ的液氦池里，只让细细的“瓶颈”口露在氦Ⅱ的液面之上。

张教授说：“你们看，液氦进到瓶内了。”同学们确实看得很清楚，液氦慢慢地从下面透过金刚砂进入瓶内了，直到内外液氦的液面相平为止。



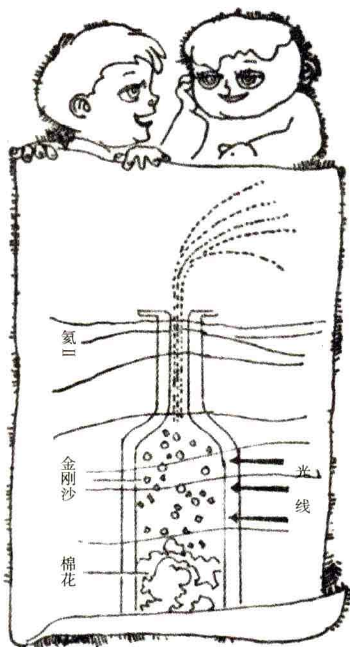


图4.2　氦Ⅱ的超流动性（喷泉效应）实验

一切准备就绪之后，张教授用手电筒对着液氦池上那奇怪的玻璃瓶瓶身部分，然后说：“你们看。” 话音刚落，只见一道亮光照了过去，说时迟，那时快，只见液氦从极细的瓶颈处向上喷了出来。张教授又增加了一个手电筒，照的光更强了，喷得更高，最高的可达二十几厘米（图4.2）。

“真漂亮，像个美丽的小喷泉。”同学们高兴得鼓起掌来。

“对，这就叫喷泉效应。这也是超流动性的一种表现。在这个试验中，光照之后，黑色的金刚砂就吸热，瓶内温度升高，氦Ⅱ受热就喷了出来。在这里，光能直接变成了机械能，光照变成了氦Ⅱ的机械运动。”

张教授说：“我在一次国际低温物理学术会议上还看过一部科技电影纪录片，放映的是好几个液氦喷泉，喷得有高有低，很有节奏，很合音乐的节拍，好像喷泉在跳舞。”

“那是怎么回事？”

“那是因为光照的强弱不同，时间的长短也不同，使得液氦获得的能量多少不同，所以喷出的液柱也就高低不同。”

“那么，如果用这个效应做一个抽水机，不是只要用光一照，就可以把水从低处抽到高处去了吗？”一个小同学问。

张教授爱抚地摸着小同学的头说：“可惜，普通的水没有超流动性。如果有的话，你就是这种光水泵的发明家了。”

“那液氦在平常是很难得到的吗？”小同学不好意思地继续发问。

“你这个问题问得好。”张教授说：“液氦确实是很难得到。液氦是地球上最后一个被液化的气体。人类为了获得液态氦，从1823年法拉第开始，到1908年的昂内斯，几代科学家，整整花了85年的时间。你们要想了解这方面的知识，可以看看液化氦的85年艰难历程吧。”



5 液化氦的85年艰难历程

人类在最初就知道利用低温为自己服务。所以，在冬天的时候搞点冰块藏在地窖里留着使用。随着现代科学技术的发展，人类对低温的需求越来越大。所以，科学家们很容易就想到通过人工液化气体来获得低温。

这其中的道理很简单。我们知到水蒸气、水、冰，是同一种物质：水。当它是气态时，超过100摄氏度；当它液化成水时，就低于100摄氏度，温度就比水蒸气低了；当它固化成冰时，温度就更低了。同样道理，常温下的各种气体，如果能把它们变成液态，那液化后的气体的温度不就更低了么。有了液化的气体，不也就有了提供低温环境的条件了吗。

1823年，英国著名的科学家法拉第（图5.1），这个没有上过大学的学徒出身的科学巨匠，最先开始了系统研究液化气体的工作。整整22年时间，他几乎液化了所有的气体。但是，有几种气体，他费尽了心机，也没能将它们液化。这几种气体是氧、氮、氢、一氧化氮、一氧化碳、甲烷。

在这同时，还有许多科学家也在做液化气体的研究。同样的结果，上面提到的那6种气体也没有能够液化成。所以，有人称它们是“永久气体”。这里没有提到氦，是因为当时还没有发现氦气。





图5.1 迈克尔·法拉第（1791—1867）

法拉第去世后第十年，法国物理学家凯勒特和瑞士物理学家皮克特在1877年分别独立地液化了氧气，获得了90 K的低温，打破了“永久气体”不能液化的迷信，极大地增强了通过液化气体获得低温的信心。

1895年，英国发明家汉普森和德国物理学家林德同时分别运用自制的制冷机液化空气成功，获得了80 K的低温，并证明可以进行工业化规模的大量生产。这样，要获得80 K的低温就不是困难的事了。

又过了三年，1898年，56岁的英国化学家、物理学家杜瓦（图5.2），在这场低温物理学史上重要的竞争中，表现卓著，克服重重困难，首次液化了氢气，将低温纪录刷新为20 K。

詹姆斯·杜瓦爵士，1842年9月20日出生于苏格兰福斯河上的坚卡丁。他是家里六兄弟中最年幼的一位。他15岁时，父母双双离世。后来，他从爱丁堡大学毕业。1875年成为剑桥大学教授，1877年成为英国皇家学会会员。

杜瓦成功的喜悦没有延续多久，也就在1898年，英国科学家拉姆赛在空气中找到了氦气。所以，液化氦气又成了低温物理学家们追逐的目标。

讲到氦气的发现，很有意思，人类是首先通过光谱分析方法在太阳上发现氦元素的存在。早在1868年8月18日，法国科学院宣布：通过光谱分析法发现太阳上有一种在地球上还没有发现



的新元素，并且把这种新元素命名为helium（希腊文“太阳”的意思），我国就译作“氦”。



图5.2 詹姆斯·杜瓦（1842—1923）

后来科学家们就努力在地球上寻找氦。找啊，找啊，整整找了三十年，在1898年6月的一天，拉姆赛终于在空气中找到了氦气。

拉姆塞在描述人类寻找氦的过程时说：“寻找氦，使我想到老教授找眼镜的笑话。他拼命地在地下找，在桌子上找，在报纸底下找，找来找去，原来眼镜就搁在自己的额头上。氦也被找了很久，而它就在空气里。”

人类发现了氦也就开始了液化氦的研究。但是，包括杜瓦在内的许多科学家都在氦的面前败下阵来，液化氦的努力均告失败。地球上就剩下最后一个没有被液化的气体：氦。历史将液化氦的重担，交给了荷兰物理学家昂内斯。

昂内斯，全名“卡末林·昂内斯”（图5.3），荷兰物理学家。由于他在低温物理学中的卓越贡献，朋友们送给他一个尊敬而又风趣的雅号：“绝对零度先生”。

昂内斯于1853年9月21日出生于荷兰的大学城格罗宁根。1870年他17岁时入格罗宁根大学学习，仅用1年时间就获得了学士学位。1871年他又就读于海德尔堡大学，1879年获得博士学位。1882年，当他只有29岁时，就已经是荷兰莱顿大学的物理




图5.3 卡末林·昂内斯
（1853–1926）

学教授和低温实验室主任了。

昂内斯似乎具有一种特殊的气质，这位29岁的莱顿大学低温实验室主任，以其非凡的气魄和胆识，把实验室的全部研究项目都转移到低温方面的研究，并采取一系列的有效措施，要创造一个现代化的大型的液化工厂，就连当时著名的物理学家洛伦兹对他的劝告他也置之不理。因为他明白，要使液化氦获得成功，必须对氦进行预冷，这就需要大量的液氧、液氮和液态空气。

昂内斯的这座液化工厂，规模很大，设备复杂，到处是钢管和泵。有人跟他开玩笑，你是不是在办啤酒厂。殊不知正是这座“啤酒厂”，一直满足着昂内斯的低温研究中不断增长的需要，直到建厂30年后也还是如此。

1906年，在杜瓦液化氢气之后8年，莱顿大学低温实验室也成功地液化了氢气，为最后攻下“液化氦”打下了坚实的基础。

1908年7月10日，一个令人难忘的日子，昂内斯开始了他筹备十多年的液化氦的实验。

实验从早上五点半就开始了，上午半天时间，都是用液化工厂生产的液态空气来液化氢气，随着时间的推移，液氢越积越多。到了傍晚，开始冷却氦气。

昂内斯作了这样的准备：让经过液氢冷却后的氦气，从高压容器的一个细细的小孔喷出来。由于氦气作喷射运动，就要消



耗能量，而容器本身又处于超低温环境中，得不到能量补充，只有消耗氦气自身的热量，即降低自身的温度，从而使氦气的温度继续往下降。

起初，试验进行得并不太顺利，供持续冷却用的液氢用完了，这时已经是晚上六七点钟了，辛苦了一天的昂内斯和助手们真有点失望，昂内斯刚刚闪过结束实验的念头，突然眼前一亮，透过玻璃制成的超低温恒温器，看到恒温器里出现了氦的液面，他不敢相信自己的眼睛，死死盯住容器的液面，液面在极为缓慢地上升，犹如奇迹降临……直到夜里九点多结束试验：人类在地球上第一次见到了液氦，温度降到了4.2 K。

1910年，昂内斯试图使氦固化，虽没成功，但他获得了1.04 K的温度。

当然，几代科学家经历了液化氦的艰难历程，并不是为液

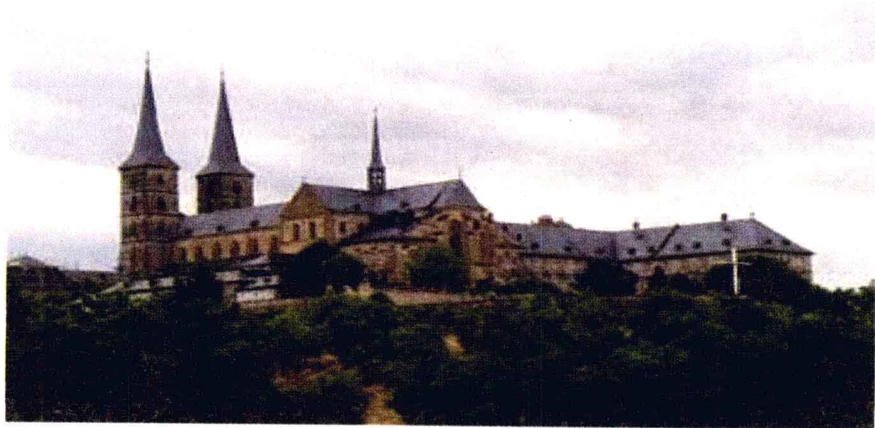


图5.4　昂内斯工作过的荷兰莱顿大学城



化而液化，而是为了获得更低的温度，以便在超低温下去研究物质的性质。昂内斯将他液化氦的成果应用到物质性质的研究上，历经3年艰苦的努力，获得了人类旷古未有、重大历史性发现：电阻失踪了！



图5.5　美丽的莱顿大学城孕育着一代科学大师：昂内斯



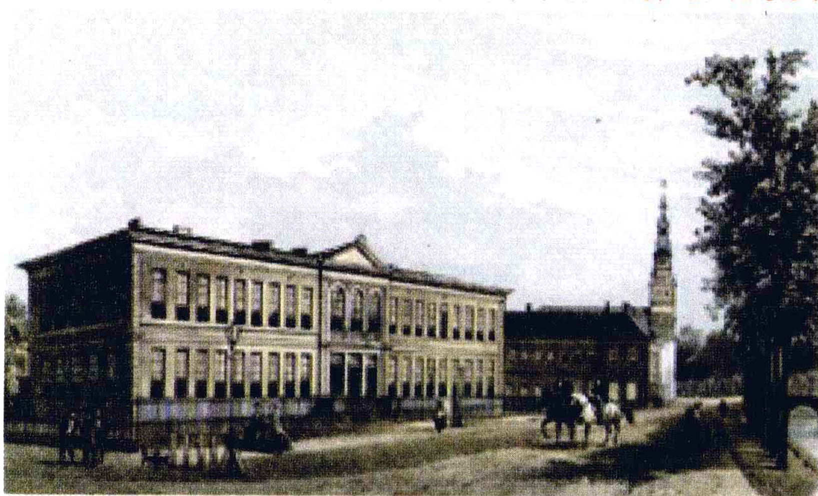
6 电阻失踪了

电阻失踪了？什么意思？

就是说，导体内本来具有的电阻，现在没有了，为零了！

在初中物理课上就讲过电阻的概念。电阻，顾名思义，就是对电流的阻碍作用。为了表示和比较不同物质对电流阻碍作用的大小，物理学家们规定，以一米长、横截面积为一平方毫米的导线在一定温度下所具有的电阻，作为这种导线的“电阻率”。电阻率越小，也就是对电流的阻碍作用越小。

图6.1 早期的昂内斯低温实验室，零电阻就是在这里被发现的





虽然许多金属导线的电阻率很小，比如，铜是0.017，银只有0.016，但是数值再小，这电阻总还是有啊，总不是零啊！

所以，同学们一定会说，凡是物质总会对电流具有一定的阻碍作用，没有电阻的物质不存在！

然而，不可否认的是，当昂内斯在运用自己获得的低温研究低温下物质的导电性时，发生了奇迹：电阻真的失踪了！

那是从1911年4月的一个试验开始的。

昂内斯解决了液化氦的问题后，就开始研究液氦温区条件下金属电阻的变化。一天，昂内斯布置他的学生兼助手霍尔斯特利用低温条件下冻结了的水银柱进行实验，观察水银柱电阻的变化。

霍尔斯特按照昂内斯的要求，一步一步地进行实验。他变更着水银柱的温度，然后测量水银柱两端的电压。先是液态空气，80 K；接着换上液氧、液氮，再换上液氢，温度降到20 K；随着温度的降低，水银柱两端的电压在逐渐减小，也就表明水银柱的电阻在逐渐减小。

最后，霍尔斯特换上了液氦，温度只有4.2 K了，电阻又减小一点。他一一记下了不同温度条件下的电阻值。

看着数据，霍尔斯特很高兴，这与老师昂内斯给他交代的其预先设想的情形非常吻合。他想，只要温度逐渐逼近绝对零度，水银柱的电阻一定会如老师预想的那样也逐渐趋向于零。

于是，霍尔斯特按老师昂内斯教的用降低氦蒸气压的办法进一步降低水银柱的温度。但是，当温度仅仅下降了一点点，到4.16 K时，电压突然降到了零。这岂不是说电阻消失了？





图6.2　1920年，昂内斯夫妇和他的科学界好友的合照

霍尔斯特很奇怪。他判断：一定是什么地方发生了短路，并试图找出短路的原因。结果，原因没找到，却发现当温度回升到4.2 K时，短路就自动消失了。温度再降到4.16 K，短路又出现了。他又转接周围的其他导线，短路仍旧存在。于是，他确信电压为零，即电阻的消失是真实的。他立即报告了昂内斯。

昂内斯立即来到实验室重复他亲自设计的这个实验，并且更换不同的实验样品继续进行实验。一次，两次，也不知道究竟重复了多少次，结果都是一样，昂内斯才确信了实验的结果：测不到水银的电阻。

在今天看来，这次实验是人类第一次观察到了超导电性。可是，当时的昂内斯对于水银柱电阻变为零这一现象并没有感到惊讶，也没有意识到这一发现的重大意义，相反，他认为这个结果



不过是证实了他以前提出的关于低温下金属电阻变化的理论。

所以，在1911年4月28日向荷兰皇家学院提交的论文《在氦温度下纯水银的电阻》中，只是客观地报告了一下实验情况，并埋怨可能是那台能够测出0.000 001欧姆电阻的电阻仪的精密度不够，测不出太小的电阻值，并表示要继续研究。

一个月后，在5月29日，昂内斯发表了有关超导电性的第二篇论文，虽然用了“水银电阻的消失”的标题，报告了进一步的实验结果，证实了水银电阻确实为零，但是仍旧认为这可能是由于没有大电流所造成的测量精密度不够的缘故。

又过了半年，在11月25日的一次会议上，昂内斯报告了新的实验结果，并公布了根据测得的实验数据所绘制的水银超导转变曲线。

12月30日，他以《论水银电阻消失速度的突变》为题将试验结果发表。

至此，昂内斯完成了最初发现超导电性的“三部曲”。

此后，在1912年这一年中，再没有发表相关水银电阻的论文，他不再研究了吗？不是！他在继续试验，继续思考！

在这一年的时间里，昂内斯处于已有理论和试验结果严重矛盾的苦恼中，他要搞明白，也必须搞明白，这矛盾是怎么回事。

原来，在获得液氦之前，没有条件去研究金属电阻在低温条件下如何变化，更没有条件去研究在绝对零度附近时金属电阻会是什么样，只能是一些推测。在学术界，有的说，温度越低，金属的电阻就越小，并最终在绝对零度时消失；也有的说，随着温度的降低，金属电阻达到一个极小值后会重新逐渐



增加，并在绝对零度时变为无限大。昂内斯在许多年里是持后一种观点的。

当昂内斯有了液氢、液氦之后，就尽快地在这两个低温区测量金属的电阻。他发现金属越纯，随着温度的降低，电阻就越小。尤其是在4.2 K温度以下时，金属铂的电阻是一个不变的常数值，并没有经过一个极小值后再增加，但也不趋向于在绝对零度时消失。因此，昂内斯放弃了原来关于金属电阻在绝对零度时变为无限大的观点，而认为这个不变的常数值标志的电阻，则是由金属铂里含有杂质造成的。于是他提出一个新的电阻理论：只要金属铂绝对的纯，没有杂质，其电阻就可能在绝对零度时消失。

所以，这个时期昂内斯的工作，就是选择更纯的金属来验证这个理论。昂内斯很自然地选择了水银。因为水银在常温下是液体，可以通过连续蒸馏法得到很高的纯度，自然比其他金属更容易提纯。

昂内斯布置了提纯水银并测量水银电阻随温度降低而变化的实验。于是，就有了本节开头提到的霍尔斯特所做的试验及其结果。了解了这些情况，昂内斯对水银电阻变为零自然不会有什么惊讶的了。

但是，昂内斯毕竟是昂内斯。一个伟大的科学家不会放弃任何微小的实验事实，而不论这些事实和自己提出的理论有多大矛盾（图6.3）。在一次又一次的重复试验中，完全出乎昂内斯意料的是水银电阻的消失速度，不是慢慢地减小，最后消失于绝对零度，而只是在液氢温区内慢慢地减小，到了4.2 K进入



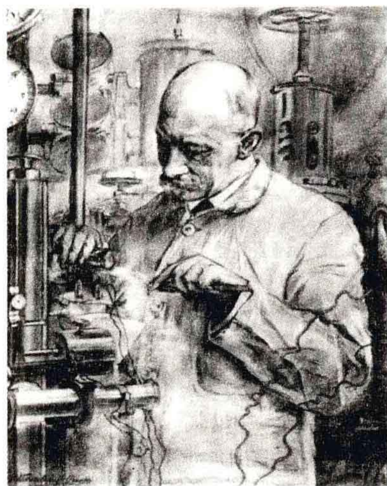


图6.3　昂内斯在实验室里（现场素描）

液氦温区时，突然加快了减小的速度，而且越来越快，到4.16 K时，还没有到绝对零度时，电阻就完全消失了。电阻以这种突然的方式消失，在每一次重复的实验中都是如此，是确信无疑的。但是却与他提出的理论相矛盾。

还有一个微小的实验事实，使昂内斯大吃一惊：有一次，实验之后得到的结果和已经做过的无数次实验的结果一样，可偶然中发现这次实验中所使用的水银样品不纯。昂内斯简直目瞪口呆，为什么含有杂质的水银和纯的水银其电阻消失的方式完全一样呢？于是，一次又一次地重复用不纯的水银来做试验，一次又一次地证明水银电阻的消失与水银所含杂质无关。这和他提出的理论又是相矛盾的。

经过了近两年的苦苦实验和研究，昂内斯根据上述矛盾，终于否定了自己提出的关于低温下电阻的理论。

到1912年12月，昂内斯又在实验中发现金属锡和铅，也有和水银一样的电阻消失的转变方式。于是，在1913年2月至5月，昂内斯连续发表了4篇关于金属电阻消失的重要论文，并在第1336期的《莱顿通讯》中第一次正式使用了“超导电性”这个词。他把这种电阻消失的状态定名为“超导电态”，把进入超导电态的温度称作“临界温度”，把能够出现超导电态的材



料称作超导体，而超导体的一个重要特性就是零电阻，又叫超导电性。

昂内斯在严谨、扎实的科学试验中，在与自身的错误理论的矛盾斗争中发现并确认了超导电性。

1913年，昂内斯因发现超导电性并制成了液氦获得了诺贝尔物理学奖。当时，瑞典皇家学院院长在诺贝尔奖授奖仪式上评价说，“卡末林·昂内斯的功绩在于，他创造了（发现超导电性的）这些可能性，同时开辟了一个对于物理科学具有最伟大意义和结果的领域。”

确实如此，谁最先液化了氦，谁就有可能获得更低的温度，谁就有可能研究新的低温条件下的物质性质，谁就有可能发现超导电性。

关于这一点，昂内斯和杜瓦形成了鲜明的对照。杜瓦当时是昂内斯最强劲的竞争对手。杜瓦液化氢时，昂内斯还忙于建设





图6.4　今天的莱顿大学莱顿中心和莱顿实验室的徽记（右上）



实验室，液化工厂才投产两年。但是，昂内斯后来居上，1906年，昂内斯液化氢成功时，已经能工业化生产获得大量的液态氢了，而杜瓦仍旧停留在实验室的演示性实验上。昂内斯液化氢成功的消息传到杜瓦耳中后，杜瓦不是急起直追，却是万分气馁，不久后他放弃了低温物理学的研究。这样，杜瓦失去了发现“超导电性”的机会。

很显然，人类艰难地寻找液化氦的方法时，并不是为了好玩，也不是为了去观看氦Ⅱ王国里那些奇妙的现象，而是为了研究低温下各种物质的性质为人类服务。尤其喜剧的是昂内斯在获得液氦之后，曾经试图得到固态氦，但没有成功。却万万没有想到，意外地在液氦温区发现了超导现象。

不过，我们无论是钦佩昂内斯有关超导电性的伟大发现，还是为杜瓦放弃低温物理学的研究而惋惜，都会产生一个联想：这超导电性究竟有什么用途？

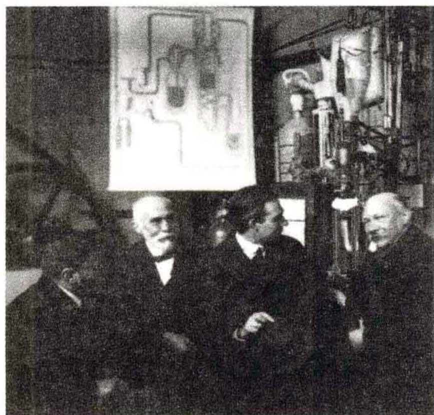


图6.5　昂内斯（右1）、玻尔、洛伦兹及厄任菲斯特（左1）在实验室中的合照



7 超导究竟有些啥用途

电阻失踪了，人类发现了超导电性。可是超导电性究竟有些什么用途呢?

是啊，人类发现了超导电性之后，虽然对其使用价值有过不少设想，但是却迟迟没有能够得到应用。

1914年，超导电性的发现者昂内斯，在超导电性发现后的第四年，亲自制成了世界上第一个超导磁体，但是应用上却失败了。自那以后，对超导的实际应用研究在相当长时间里没有得到重视。

一直到1961年，由于几种新超导材料的发现，使超导走出了实验室，成为一个独立的新兴的技术部门。这个发现就是超导电材料：铌锆合金、铌钛合金和铌锡化合物等材料的发现。用这些材料所做的导线，绕成线圈可以产生高达20万高斯的强磁场。

同学们可不要以为，绕一个电磁铁没有什么稀奇，这可是超导的一个重大用途。

因为从理论上讲，要提高磁体的磁力，即磁场强度，一是增加线圈的圈数，二是增加输入的电流，三是还可以加粗磁体的铁芯。

可是，在实际中，这三条都难奏效。比如，增大电流，那绕线圈的铜导线，电阻率虽然小，总还是有电阻，通过的电流迅速



增大，产生的热量也就迅速增大，加上通电后还有磁阻，电流越大磁阻也就越大，产生的热量也就会越大，两者合起来所产生的热量就更大。电流大到一定程度，所产生的热量太大，就把线圈的铜导线给熔化了，就是我们平常所说的线圈被烧断了。

如果是增加线圈，也不行。因为增加线圈，就增长了导线，等于增加电阻，线圈还是会被烧断。

第三个办法，是增粗电磁铁的铁芯。这个办法也不行。

因为铁芯材料具有饱和磁化的特征。所谓饱和磁化，就好像一个人吃饱了饭就不想再吃一样，铁芯材料“吃”饱了“磁”之后也就不想再“吃”了。不管将铁芯做得多大，磁场强度的增加总有一个极限，到了极限也就不会增加了。而无限制的扩大铁芯也是不可能的。

早在20世纪60年代美国的贝尔电话实验室，就建造了一台10万高斯的常规磁体。为了提高磁场强度，它采用增大输入电流的办法，结果消耗的电能特别大，仅仅磁体本身运行的用电量就高达1 600千瓦，耗掉了这个研究机构用电量的四分之一。为了使线圈铜导线不致熔断，它采用流动的水来冷却，冷却水每分钟的流量高达4 500升。也就是说，这个磁体每用一天，就要消耗38 400度电，消耗648万升冷却水（合6 480吨）。前苏联也曾经建造了一个10万高斯场强的常规磁体，供电量高达2 200千瓦，冷却水的用量大得惊人。

除此之外，这种常规磁体为了把线圈导线上产生的热量及时排走，克服许多因此而产生的困难，所需要的设备十分庞大，又非常复杂，开动起来既笨拙，不灵活，也不便于使用。之所



以如此，是因为在超导磁体实用化之前，人们为了研究工作的需要，没有其他办法，不得不这样做的。

如今，超导磁体出现了，就不必再这样做了，相反，可以利用超导技术给这些臃肿的“胖子”减肥。因为超导磁体不仅可以产生相当高的磁场强度，而且还有许多常规磁体无法比拟的优点：

优点一，由于超导体在超导态时电阻为零，不会产生热量，不用担心线圈会烧断，用大电流提高场强就很容易做到，也不需要用大量的冷却水来冷却，免去了制造庞大复杂的冷却系统。这样一来，就是把超导磁体用的低温源（液氦）的消耗计算在内，成本也极大地降低。有人计算过，可以降低到原来的十分之一甚至百分之一。表7.1是建造一个直径3.5米、磁场强度2万高斯磁体的成本比较。

表7.1　建造直径3.5米、磁场强度2万高斯的常规磁体和超导磁体的成本比较

费用名称 / 磁体名称	建造费（万美元）			运转费（万美元）	合计（万美元）
	磁体	电源	冷却系统		
常规磁体	194	30	14	400	638
超导磁体	199	3	20	40	262

优点二，由于超导磁体线圈上可以通过很大电流，因此圈数可少可多，加之不用冷却设备，所以体积小，重量轻。例如，要建造一个4～5万高斯的超导磁体，重量不过几公斤，而造一个同样场强的常规磁体会重达15～20吨。



优点三，超导磁体所需的电源功率小，一个10万高斯场强的超导磁体可以方便地用汽车蓄电池作为电源，并且采用建立持续电流的办法，一经充电完毕，就可以去掉外接电源，只要超导电性不被破坏，将永远保持恒定的电流而不衰减，再也不用供电。而常规磁体则一刻也不能断电，一不供电，磁体磁场就没有了，而且供电的功率要比超导磁体的大到上千倍。

优点四，超导磁体的磁场稳定性好，均匀度高，易于启动，能长期运转，可以满足不同的需要。

可见，利用超导电性制作超导磁体，是一个多么了不起的发明。从那以后，超导技术及其应用的研究发展很快，应用的领域也广阔地展现在人们眼前。

图7.1是在网上销售的一种商品："零液氦消耗超导磁体"。它是牛津仪器最新研制的产品，不仅具有零液氦消耗、在液氦条件下的磁体高磁场强度、高稳定性等特点，而且体积特别小，直径只有8.3米，高度5.5米，和上面说的常规磁体相比则可谓小巧玲珑了。为科研提供了一个更为简便、可靠的高性能磁体。其零液氦消耗特性尤其适合液氦价格昂贵的地区或野外使用。

日本的超导专家台岛川恭治和户叶一正在他们的著作《超导，高技术的突破口》一书中说："无论在哪一个领域，超导应用技术的开发，都将成为许多新技术得以实现的关键所在。"目前，仅仅是有现实性并可以想象得到的领域，就有能源、同步加速器、交通系统、船舶动力、约瑟夫森器件、发电、输电缆、电力存储和医疗设备等。他还在书中形象地画了一个超导



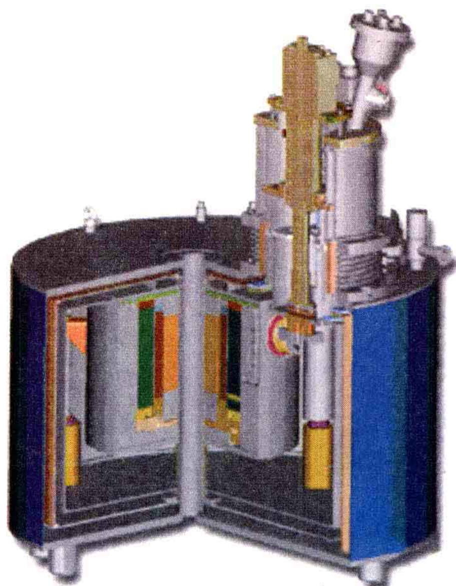


图7.1　市场上可以买到的体积小、零液氦消耗的超导磁体

应用树（图7.2）。

确实如此。目前，在超导应用上，处于领先地位的是超导磁体的制造和使用。难怪有人说，超导磁体不只是常规磁体的替代品，而是对常规磁体的革命。下面，就给同学们介绍超导磁体的各种用途。先给大家说说，超导磁体是一种可以给基本粒子加速的“弹弓”！



图7.2　日本超导专家绘制的超导应用树



8 给基本粒子加速的“弹弓”

为什么说超导磁体是可以给基本粒子加速的“弹弓”呢?

当然，这是一种比喻。讲到基本粒子，同学们可能就会想到加速器、对撞机。从原理上讲，加速器、对撞机就像是孩子们手中的一把“弹弓”。弹弓可以给石子加速，射中目标，加速器可以给粒子加速，轰击目标，用来进行科学研究。那你们知道，弹弓给石子加速靠的是橡皮筋的弹力，加速器给粒子加速靠的是什么?靠的是高磁场强度磁体的磁力。

加速器、对撞机，这类名词对于同学们已经不算陌生了，报纸上经常报道的中国科学院高能物理研究所的“正负电子对撞机”（图8.1）和中国科技大学的“电子同步辐射加速器实验室”（图8.2）就是其中之一。



图8.1　中国科学院高能物理研究所的正负电子对撞机





图8.2　中国科学技术大学的电子同步辐射加速器实验室

那么，为什么世界上许多国家都在造加速器呢？

加速器，是基本粒子物理学研究的重要工具。基本粒子物理学是研究质子、中子、超子、介子、电子、中微子、光子等许多种粒子性质的一门科学，而且是一门非常重要的学科。基本粒子又那么小，看也看不见，摸也摸不着，只能借助于加速器、对撞机这一类的研究设施来研究它们。

在粒子物理实验研究中使用的方法，就是通过用具有很高能量的粒子去轰击另一个粒子，使它们之间发生相互碰撞，打开粒子内部的结构，才能了解粒子的性质。要让小小的基本粒子能够相互碰上，这就需要能够约束、控制住粒子的运动；要能把被轰击的目标粒子打开，就必须把用来当作“炮弹”的那个粒子的能量提得很高很高。于是，专门用来提高粒子能量的加速器就诞生了。所以，从本质上讲加速器应该叫加能器。也正因为如此，粒子物理学又被称为高能物理学。

高能加速器有三大类。第一类是固定靶加速器。这类加速器



里，将作为被轰击的对象粒子固定在靶位上，然后加速用来轰击的粒子，使其具有很高的能量，最后将其引导去轰击靶粒子。

第二类加速器称为“对撞机”。它同时加速两束粒子，不过二者运动的方向相反，然后被引导在反应点相撞击。对撞机的最大优点是能量的利用率很高。按加速的粒子不同，对撞机可分为正负电子对撞机、电子质子对撞机、质子质子对撞机、质子反质子对撞机等。

第三类加速器称为“同步辐射装置”。这种加速器加速粒子、提高粒子能量不是用来去撞击目标粒子的，而是利用高能粒子由于释放能量而辐射出来的光子，作为高质量的光源用于科学研究的。

不过，不论上述哪一种类型的加速器，在给粒子加速的这一点上是相同的。

玩过弹弓的人都知道，要给石子加速，就要把橡皮筋拉得足够长，猛然一松手，石子在弹力的加速下就射出去了。那么，加速器里的磁体是怎样给粒子加速并射出去的呢?

在中学物理课本上就讲过，带电粒子在磁场里作与磁力线相垂直的方向运动时，粒子就受到磁场的作用。在加速器里就属于这种情形。注入到加速器储存环管道（又称加速腔）里的粒子，具有一个初速度，在进入加速腔的磁场时就受到磁场力的作用，只要磁场没有撤销，这个磁场力的作用也就一直存在，粒子始终受到磁场力的持续作用，自然就会产生加速度，越走越快了。

科学家们经过研究和计算，粒子绕着与磁力线平面相垂直的平面作圆周回转运动时的频率，决定于三个因素：一是磁场



强度，二是粒子所带电荷，三是粒子自身的质量。所谓“回转的频率”，实际上就是粒子作圆周运动的速度。而粒子一经确定，它的电荷、质量是固定的，所以要提高粒子的速度，主要的办法就是必须提高加速器磁体的磁场强度。

随着高能物理学研究的深入，对加速器能量的要求越来越高。有不少经过科学预测应该存在的基本粒子在已有的加速器上尚未找到存在的证据。因此，人们推测，这些应该存在的粒子，需要用更高能量的加速器去发现。而高能量的加速器主要靠高场强磁体，所以可以这么说，谁掌握更高磁场强度的磁体，谁就可能有重大发现。

怎样才能获得高场强磁体呢?

正如我们在前面分析的，对于常规磁体，要提高磁场强度，一是提高输入电流，二是增加线圈的圈数，三是加大加速器圆环的周长。前两个办法肯定不行，不仅提高的场强有限，而且磁体过度发热，会烧坏磁体。

加大加速器圆环的周长，从理论上说，被加速的粒子的能量与轨道半径成正比。所以，加速器圆环越造越大。起先，周长6.3千米就觉得很长很大了。后来又有个国家造了个周长16千米的高能加速器。近年来，甚至还有人要设计周长85千米的特大型加速器。

但是，增加加速器圆环的半径，毕竟是有限的，不可能为达到研究课题的需要，而无限地增加，而且半径越大，也增加了调试的困难，同时占地面积过大，还会因此增加土建费用。

所以，加速器中使用的磁体改用超导磁体可以一举两得，一



是磁场强度增加了，二是加速器圆环的周长也就可以相应地减小了，就可以大大减小土建工程量和建材经费。

比如，一台3 000亿电子伏的同步加速器，如果用1.2万高斯常规磁体，加速器圆环的粒子轨道半径是1.2千米；如果改用6万高斯的超导磁体，则粒子轨道半径可以减小到170米。这样，不仅磁场强度增加了4倍，而且半径缩小了约6/7。

在加速器巨大的储存环管腔内的磁体有两种：偏转磁体和聚束磁体。

因为高速的粒子只可能进行直线运动，它是不会拐弯的，只能是运行一个直线段，由磁铁控制它拐弯，这个任务就由“偏转磁体”来完成。图8.3中红色的部分就是偏转磁体。高速粒子从这个偏转磁体出来，直线往前，到了第二个偏转磁体时再拐一点弯……，这样一个一个的偏转磁体就把高速粒子控制着作大致的圆周运动。可见，说是“储存环”，实际上不是一个绝对的圆环。

此外，高速粒子一直在运动中，还可能不听话，向四周“散射”，所以要用“聚束磁体”来约束它们，让他们集中在一起往前运动，并继续给他们加速。在图8.3中绿色的部分就是聚束磁体。

没有偏转磁体，粒子束就不会呈环状运动；没有聚束磁体，粒子束的宽度就得不到控制，粒子速度就得不到继续增加。

偏转磁体和聚束磁体改用超导磁体就可大大提高偏转能力和聚束能力。

在高能加速器上使用超导磁体，最早是美国的费米实验室。





上图中大环内的小环为加速环，给粒子初步加速，然后注入外部大的粒子储存环继续加速，用于实验。右图是以一段直线加速器给粒子初步加速，然后注入储存环。

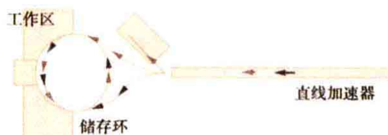


图8.3 电子同步辐射加速器工作原理图

他们造的世界上第一台超导加速器，能量为8 000亿电子伏，使用了将近1 000块二极超导偏转磁体和四级聚束超导磁体，建造了一个周长6千米的大环，于1983年调试成功，目前在正常运行。

德国建造的8 200亿电子伏的超导加速器，由650多块二极磁体和四极磁体组成周长6公里的大环，于1990年完成。

1989年9月，美国科学家得到美国国会批准，要建造一台“超导超级对撞机”。这台加速器是周长87千米的质子-质子对撞机，预算耗资60亿美元。据公布的材料，仅偏转磁体就有7 764块，需要的铌钛超导线上千吨。到了1991年，该项目又被众议院以87票之差否决了。虽然1992年又遇转机，得到了当年的财政拨款，可是好景不长，1993年底，美国众、参两院又



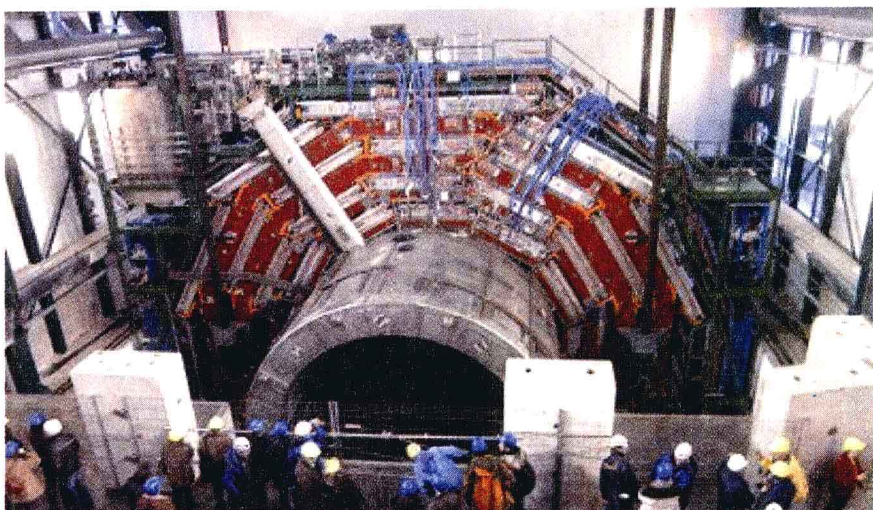


图8.4　欧洲核子研究中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）的施工现场

以多数票否决了这个计划，并且马上同意拨款6.4亿美元作关门费。美国许多物理学家对此表示悲哀和无奈。

此外，在世界上引起强烈关注的是欧洲核子研究中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）于2008年9月10日正式启动运行（图8.4～图8.6）。

这个修建在法国和瑞士边境下面隧道里的对撞机，是一个被人们称为世界上规模最庞大的科学计划，世界上最大的机器，在全球九个规模最大的科学工程中它排第一。经过十几年的建造，如今成功地实现了第一束质子束流贯穿整个对撞机。在第一束质子束流实现贯穿后，经过数小时至数十小时调试，第二束质子束流被反方向注入对撞机。再经过一段时间极其复杂精密的调试，开始实现两束质子束流的对撞。来自80多个国家和地区、7 000名科学家和工程师参与了大型强子对撞机的建设。





图8.5 大型强子对撞机隧道内的冷磁体

中国近10所科研院所和高校的科研人员参加了大型强子对撞机上所有4个大实验的大型探测器的建造。

这个目前世界上最大的对撞机拥有数千个磁体，全部都是采用超导磁体。它能利用液态氦维持它的低温环境。这些磁体排列成环形，并沿着巨大的隧道延伸27千米。负责领导大型强子对撞机的电子元件试运行工作的洛博托·萨伯恩教授表示，为了在没有太大能量的情况下获得高磁场，这些磁体必须具有“超导性”。氦Ⅱ的超流动性让它能迅速传导热量，成为极其有效的制冷剂。这样，我们可以一步一步把温度降到1.9 K。萨伯恩解释说，至今还没有规模如此庞大的物理设备能在如此低的温度下运行。

媒体对此发出惊呼：大型强子对撞机正在制造一个宇宙中最



冷的地方。因为遥远外太空的温度也是2.7 K。

大型强子对撞机工作原理：在环形粒子加速器管道内部，两条被称之为“强子”（质子或者铅离子）的亚原子粒子束，朝着相对的方向运行。这些粒子每运行一圈，就会获得更多的能量。然后在需要的时候，让它们迎面相互对撞，用4个巨型探测器进行探测，并对撞击过程和结果进行分析，希望在这些碰撞产生的碎片中发现新粒子。

因为在过去几十年里，物理学家不断在细节上加深了对构成宇宙的基本粒子及其交互作用的了解。了解的加深让粒子物理学的“标准模型”变得更为丰满，但这个模型中仍存在缝隙，以至于我们无法绘制一幅完整的关于粒子世界图画。为了帮助科学家揭示粒子物理学上这些关键性的未解之谜，需要大量实验数据支持，大型强子对撞机便担负起“数据提供者”的角色，这也是非常重要的一个步骤。

科学家预计，大型强子对撞机将可以帮助破解世界上的五大科学谜团：什么是质量？什么是暗物质？反物质在哪里？是否存在四维空间和宇宙的形成等。

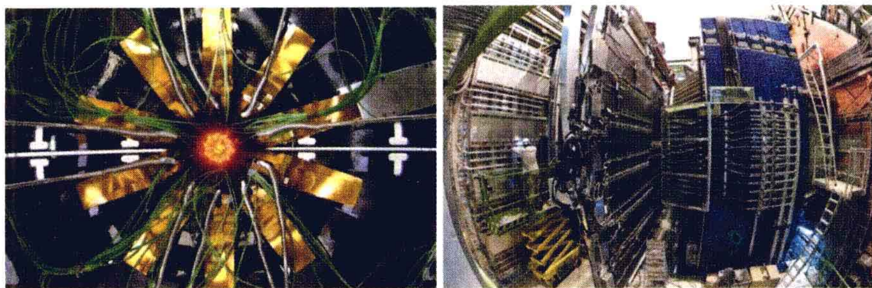


图8.6　Alice探测器，重1.25吨，是大型强子对撞机4个巨型探测器中的一个



科学家们认为，这些谜团的解开，需要对微观粒子世界进行研究，那么强子对撞机正可以派上用场。

还有，我国北京正负电子对撞机（图8.7）也是需要使用大型超导磁体的科学研究装置。它是一个使正负电子产生对撞的设备。利用它将各种粒子加速到极高的能量，然后使高能粒子相互对撞，研究粒子在对撞时产生的各种反应，研究其反应的性质，发现新粒子、新现象。

北京正负电子对撞机于1988年10月竣工，10月16日凌晨实现第一次对撞时，曾被形容为“我国继原子弹、氢弹爆炸成功、人造卫星上天之后，在高科技领域又一重大突破性成就”。如今，20年过去了，它在粒子物理领域取得了许多成就。

尤其是北京正负电子对撞机重大改造工程（BEPCⅡ）在2008年7月圆满完成，其中超导磁铁和低温系统研制更是实现了关键性的技术突破；加速器与北京谱仪联合调试对撞成功，并观察到了正负电子对撞产生的物理事例。改造后的BEPCⅡ，将在世界同类型装置中继续保持领先地位，成为国际上最先进的双环对撞机之一。



图8.7　北京正负电子对撞机的储存环



9 耐一亿度高温的“磁瓶”

“磁瓶”，可不是瓷瓶，也不是搪瓷瓶。它是用看不见、摸不着的磁场做成的“容器”。它没有器壁，却能把温度高达一亿摄氏度的等离子体装在里面。

那么，什么是等离子体？为什么有这么高的温度？这磁瓶是怎么装的？为什么要研究它？

其实，等离子体并不是新鲜玩意儿，你每天都能见到它。你在给家用电器接电源时，当电线插头在接触电源插座时，会爆出火花，那火花就是等离子体；晚上，你在街道上漫步，那布满街市、五光十色的霓虹灯，灯管里就是等离子体；还有那天天见面的太阳，整个太阳就是等离子体组成的（图9.1）。

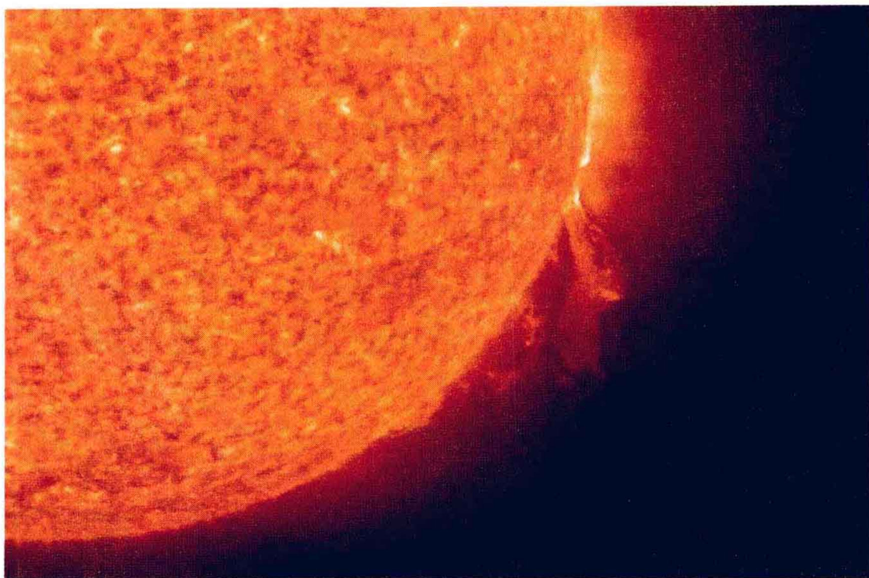
那这磁瓶是怎么装等离子体的？为什么要研究它？

要回答这些问题，还要从煮饭要用煤、点灯要用油谈起。

同学们都知道，不仅煮饭要用煤，点灯要用油，而且火车、发电厂要用煤，汽车、飞机要用油，……可是，一般的人中，很少有人去想，有朝一日地球上的煤、石油、天然气都烧完了，那该怎么办？

不过，这没有关系！许多科学家都在思考和着手解决这个问题。他们在想方设法地寻找新的“能够烧”的燃料。这就是经常说的“探索新能源”的工作。




图9.1 太阳表面抛出的等离子体流照片

“受控热核聚变反应”就是正在探索的很有前景的新能源。

聚变反应，是指两个轻的原子核发生碰撞，聚合成较重的原子核的反应。可用来进行反应的物质，主要是氘和氚，它们都是氢的同位素。普通的氢原子核就是1个质子。氘，念“刀”字的音，氘核里有1个质子、1个中子。还有氚，念“川”字的音，氚核里有1个质子、2个中子。氘可以聚合反应生成氚。但是，反应效率最高的是氘和氚的聚变，结合生成氦，释放出能量（图9.2）。由于聚变反应放出巨大的热量，会产生极高的温度，所以又被称作“热核反应”。

热核聚变反应放出的能量极大。1升海水中提炼出来的氘进行聚变反应放出的热量相当于300升汽油燃烧后放出的热量。真



是海水可以当作汽油用了！

氘在地球上很丰富，每立方米的海水中就有30克，可以用电解法来提取。氚是不稳定的放射性同位素，在自然界里没有，必须用锂来制取。地壳里有不少锂，海水中也有一些。全世界的海洋里共有35万亿吨的氘，这足以从现在到可以预见的遥远的将来供应人类所需的能量，就根本不存在“能源危机”了。

如此说来，那就赶紧研究人工热核聚变反应吧。

实现人工热核聚变反应并不难。氢弹已经造出来了（见图9.3），那就是人工热核聚变反应。但是，氢弹爆炸的能量无法利用。只有将氢弹爆炸的那种反应在人工控制下进行，才有可能把能量变成能利用的动力。这就叫“人工受控热核聚变反应”，简称“受控”反应。

然而，实现“受控”，谈何容易！

它要满足三个相互关联的条件：

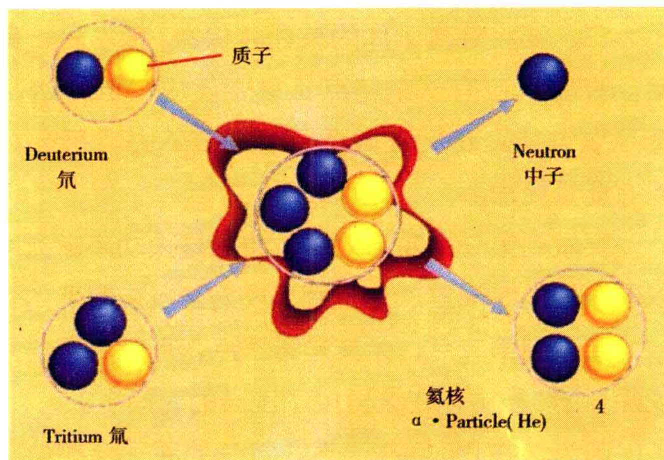


图9.2 氘与氚聚变反应原理图





图9.3 氢弹爆炸时升起的蘑菇云

一、温度达到1亿度（10^8 K）。

二、等离子体密度要达到10^{15} 个/厘米^3。

三、要将等离子体约束住并保持1秒左右，聚变反应即可开始。聚变反应有一个特点：只要反应一旦开始，它所放出的能量足以维持聚变反应自身持续进行下去。那么，这个系统就可以有能量输出。

要做到第一点并不太难，特别是大功率激光能源的出现，可以在极短的时间里产生几百万度乃至反应需要的温度。

要做到第二点，尤其是第三点，可就难了。平时，对我们来说短暂的1秒钟，在这里成了漫长的时间了。

因为，在1亿度高温下，氘气的原子全部电离了。就是说，



几乎全部原子中的原子核和原子核外面的电子都分离开了，变成了原子核和自由电子的集合体了。原子核是正离子，自由电子是负离子，正负离子电荷相反，总量相等，所以集合体在整体上不带电，仍是中性。科学家们把这种正负离子的集合体称作“等离子体”。要约束住这么高温的等离子体，是一切已知的钢、铜、金、银等材料所承受不起的。这些材料一接触等离子体就会立刻融化，化为乌有，等离子体也会因此降温。

怎么办？科学家想了许多方法，其中一个方法就是造一种“磁瓶”“磁箱子”，把等离子体装起来。因为等离子体是由带电离子组成的，而带电粒子最听磁场的话，有磁场约束，带电粒子就不会和反应装置的器壁接触了。

1907年，就有人造过“磁瓶”，即造过磁约束装置，也确实能起作用，但是由于约束时间太短，没能成功。

1954年，前苏联物理学家阿尔茨莫维奇提出了磁约束概念，并建成了第一个磁约束装置。这个装置被称作“托卡马克”（Tokamak）。它是俄语里“磁线圈环形真空室”的缩写。图9.4是托卡马克装置的原理图。

它是一个由封闭磁场组成的“容器”，形状像一个放倒的轮胎。由于等离子体中每个粒子都是显示电性的，会受磁场的约束，带电粒子会沿封闭的磁力线做螺旋式运动，所以上亿度高温的等离子体就这样被约束在这种环形的磁场中。这种环形的磁场就称作“磁瓶”或“磁笼”，看不见，摸不着，也不接触有形的物体，因而也就不怕高温，可以把炙热的等离子体托举在空中。



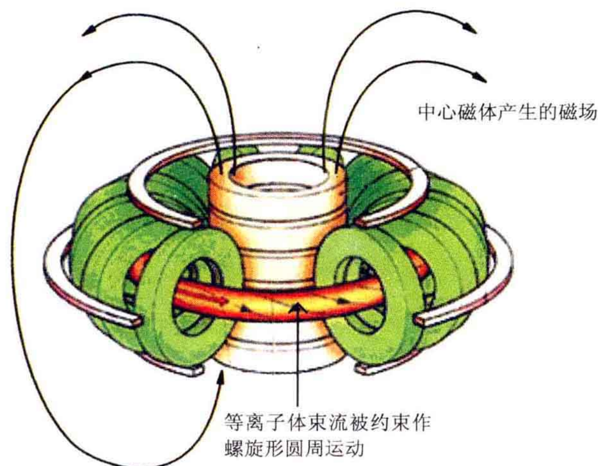


图9.4 等离子体磁约束装置：托卡马克的原理图

托卡马克装置既然是磁瓶，当然也就要用磁体了。

经过近半个多世纪的努力，在托卡马克装置上产生聚变能的可行性已被证实。但是，目前，全世界各地一般实验用的托卡马克装置都采用常规磁体。要提高常规磁体的场强，就要加大电流，一旦真要投入使用，需要耗用一个中等城市的电力。越接近实用的研究，就越要采用更高场强的磁体，那耗费的电力就更大。从成本核算上说也是不经济的，因为那很可能耗费在磁体和冷却中的电力比它能发出的电力还要大，岂不是得不偿失，有违初衷。

所以，超导磁体一问世，就受到研究“受控热核反应”专家们的关注。超导技术成功地应用于产生托卡马克强磁场的线圈上，是受控热核聚变研究的一个重大突破。

前苏联的托卡马克7号装置是世界上第一个使用超导环形磁



体产生环形磁场的托卡马克装置。早在1979年就开始用它进行等离子体物理的试验。到80年代初，他们开始了托卡马克15号装置的超导环形磁体系统的建立。这是一个中型装置，大环半径只有2.43米，中心磁场达5万高斯，最大磁场高达9万高斯，已经建成开始调试。

与此同时，法国也建造了一个中型托卡马克装置，其特点是磁场线圈采用铌钛超导材料，并使用超流态氦Ⅱ作超导冷却用。

不过，这些装置目前只能供等离子体物理研究和试验使用。

1991年11月9日在英国的卡拉姆，由14国联合建造的欧洲核聚变环形装置上，受控研究获得重大突破，用氘掺氚作原料，温度2亿度，持续时间2秒，说明聚变反应确已进行。这是一个重要里程碑，它表明“受控”研究可以向工程技术反应堆过渡了。

中国科学院等离子体物理研究所自行设计、研制的全超导托卡马克EAST（原名HT-7）装置于2006年调试成功，投入运行。

这个装置规模大，具备独有的非圆截面（图9.6）、全超导

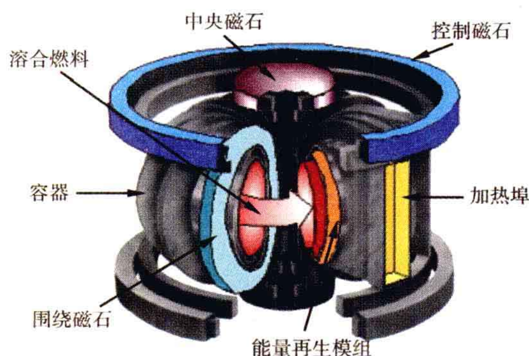


图9.5　托卡马克的实体图



及主动冷却内部结构三大特性。它的最大贡献就是把托克马卡已经取得的巨大进展过渡到稳态运行。它是世界第一个全超导的可以稳态运行的托卡马克装置。

2007年1—2月，EAST在第二轮等离子体放电实验中，获得了稳定、可控、具有大拉长比的偏滤器位形等离子体放电，最大等离子体电流达0.5兆安培，在0.2兆安培等离子体电流下最长放电达9秒，并成功完成了磁体、低温、总控和保护、等离子体控制等多项重要工程测试和物理实验。

超导托卡马克使磁约束位形能连续稳态运行，是公认的探索和解决未来聚变反应堆工程及物理问题的最有效的途径。EAST（图9.7）工作的成功，将更有利于探索等离子体稳态先进运

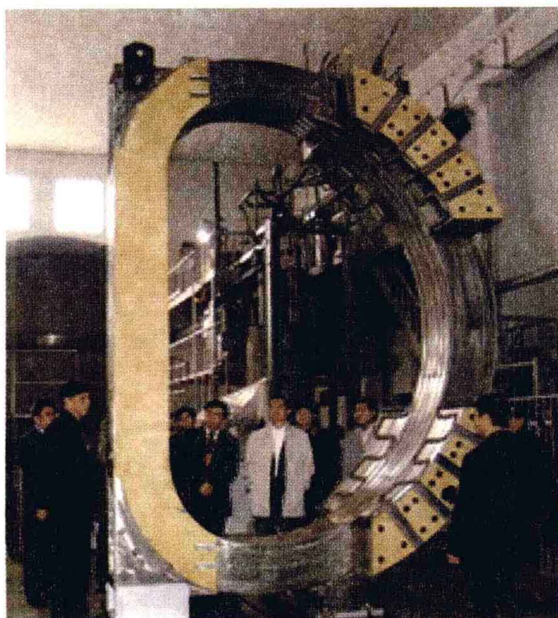


图9.6　中国科学院等离子所自行设计研制的EAST全超导托卡马克装置中的“非圆截面”是指等离子体区域的横截面为非圆形



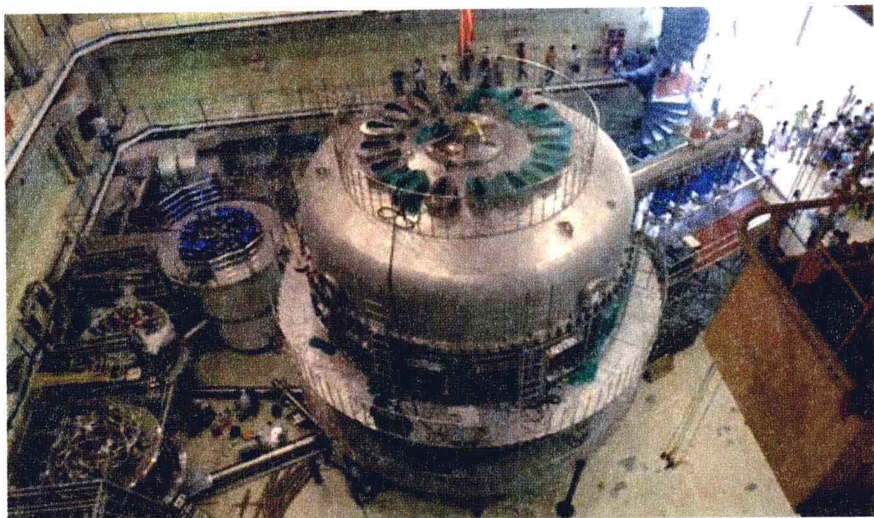


图9.7 中国科学院等离子体物理研究所自行设计研制的托卡马克装置

行模式，其工程建设和物理研究可为“国际热核聚变实验反应堆”（ITER）项目（图9.8）的建设提供直接经验，并为未来聚变实验堆提供重要的工程和物理实验基础。

如今，距离当年第一次氢弹爆炸，50多年的时间过去了，尽管世界上许多国家建起了核电站，人类还是没有看到一座核聚变发电站的出现。但是核聚变电站的诱人前景依然是人们心中一个割舍不去的梦。50多年来，全世界都在努力为建立一个能够控制核聚变的装置而奋斗。在30多个国家建造的大大小小上百个实验装置上，每一次放电时间的延长，虽然只是延长1秒、2秒，人们都为之兴奋；每一次温度的提高，人们都为之欢呼；因为这看似小小的进步，都意味着我们离聚变能的应用更近了一步。



图9.8　以超导托卡马克为基础的国际热核聚变实验反应堆（ITER）装置示意图
1—中心螺管；2—外部线圈结构；3—纵场线圈；4—极向场线圈；
5—主机支撑；6—主环低温泵；7—偏滤器；8—水平窗口；
9—外杜瓦；10—真空室；11—包层模块；12—工作人员



为了实现这一目标，国际热核聚变实验反应堆（ITER）（图9.8）已从2007年启动。它是世界上第一个示范级核聚变反应堆，建在法国南部的卡达拉舍，历时8年，预计于2015年建成。届时，如果一切顺利，它将成为世界上第一个产出能量大于输入能量的核聚变装置，计划运行21年。ITER本身将不用来发电，它是一个实验装置，其长期任务是取得技术上的关键突破：越过能量的“收支平衡点”，证明利用核聚变能在技术上是可行的，具有实用价值。

ITER是一个事关世界未来能源安全的重大国际合作项目，其意义不下于人类基因组计划和国际空间站。

如果ITER取得成功，人们将在2035年左右建造一个叫DEMO的试验反应堆。然后在2050年建造第一个商业化反应堆，2060年增加到10个，2100年增加到1 500个，满足全球电力20%的需求。当然，科学成果是不能预约的，这是人类共同的美好愿望。

到那时，人们将会更加理解中国人EAST（HT-7）成就的里程碑意义。

除了托卡马克装置外，串联磁镜式装置也是一种磁约束装置，这种装置的研究者们也纷纷采用大型超导磁体。这方面以美国的利弗莫尔实验室的超导串联磁镜为规模最大，包含有二十几个大型超导螺线管磁体。不过从目前来看，这一方案尚不如托卡马克装置成功的希望大。



10 没有螺旋桨的潜水艇

同学们先看一下科学小说《CD201号潜艇》中的一段内容：

浩瀚的大海，烟波浩渺，横无际涯，气象万千。可是，在深邃的海底却异常平静。我海军某部8018号潜艇正在执行巡航任务。突然，观测员报告说："右前方发现目标，方位：东经112°，北纬22° 31′，距离2.3海里。"

稍顷，舰长室里的扩音器又响起观测员急促的声音："右前方，敌CD201号潜艇！敌CD201号潜艇！"

"停车！注意观察，不要惊动它。"舰长的眉宇间露出喜悦的神情，长长地出了口气，回头对坐在一边的政委说："半个月了，总算找到它了。怎么办？"

"你说呢？"

"干掉它！"

"你忘了？出发前，首长不是说过，CD201是一艘新式潜艇，只要活的不要死的。"

舰长笑了笑，点点头，拿起话筒，精神振奋地命令："全舰注意，全舰注意，各就各位，准备战斗。按第一套攻击方案，只伤皮肉，不动筋骨，要抓活的。全速航行！"

8018号潜艇全速向敌潜艇追了上去……

突然，话筒里传来观察员紧张的声音："目标，目标——在



快速离去，在……目标消失！”

“快！追！立即搜索。”舰长十分纳闷。

8018号潜艇的监测装置全部打开，进行扫描搜索。

声呐仪搜索结果：没有发现目标。

微声监测器搜索结果：没有发现任何螺旋桨的轻微声响，也未发现螺旋桨旋转振动发出的声响。

“难道这家伙没有螺旋桨？”舰长格外纳闷，“它是怎么行驶的？为什么那么快？”

电场监测仪搜索结果：发现目标经过的海域有残留电场。追踪电场的去向正好与目标逃离的方向一致。我潜艇全速航行已15分钟，尚没有追到此残留电场的尽头。

“沿着残留电场的去向继续追！”舰长命令。

一个小时后，总部首长来电：立即反航！

舰长只好垂头丧气地返航了。当8018号潜艇回到港口时，CD201号潜艇已经停泊在港口里了。原来这是一次演习。只见海军部队首长迎面向8018号潜艇走来，乐呵呵地说：“怎么样，这回该认输了吧？”8018号艇长，这位几十年来在海战中还没有打过败仗的孤胆英雄，在这次演习中是心服口服了。

……

小说就摘取这么一段，小说中的CD201号潜艇究竟是一种什么样的潜艇呢？

原来，它是应用超导磁体制作的一种新式潜艇。它没有螺旋桨，而是使用“超导电磁推进器”（又称“超导磁流体推进器”）来作航行动力的。



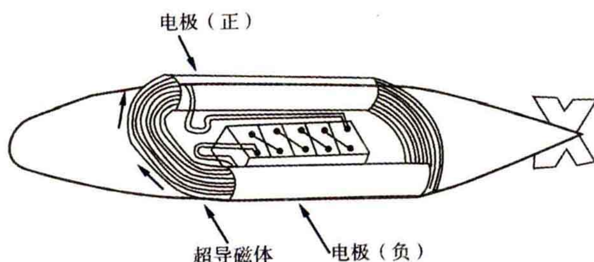


图10.1　水下超导电磁推进器原理（1）

这里的“电磁推进器”是个什么样的装置呢？

原来，在潜艇内部装了一个超导磁体，并保证磁体的低温环境，维持超导状态，那么只要很小的电流就可产生强大的磁场。因为超导电流是持续的，所以磁场也是持续的，并且包围着整个潜艇。同时，在潜艇的两侧，一侧安放了一个正电极，另一侧安放了一个负电极，而海水是导电的，所以潜艇没入水中后，等于用导电的海水接通了两个电极，于是海水中就会有电流通过（图10.1）。

就算海水中有电流通过，又怎么会推动潜艇航行的呢？

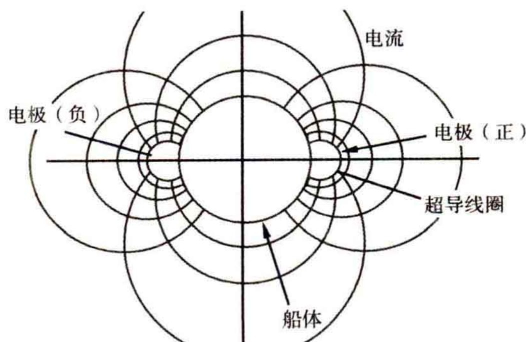


图10.2　水下超导电磁推进器原理（2）

这个道理也简单。在初中物理课本上就讲过，通电线圈在磁场中会受到力的作用。

这里，潜艇的两个电极是相连的，通过海水又连接起来，



海水和潜艇等于组成了一个通电的线圈，这个“线圈”在超导磁体产生的磁场中就要受到一个推动力。只要调整超导磁体产生的磁场，就可使这个推动力朝向潜艇前进的方向（图10.2）。

也许同学们会说，你这个说法，对于潜水艇确实是可以，因为整个潜艇都没在海水中。那些在水面上行使的船只呢？这种推进器能行吗？回答是可以的。

这也不难，对于在水面上行使的船只，把这种推进器安装在原来放置螺旋桨的位置，只要它没入海水中就可以了。我们用图10.3来说明这种推进器的原理。图中画了一个左手，表示运用的是“左手定则”。如图所示，超导线圈产生的磁场方向是从上到下，即图中食指的方向；海水流入推进器管道，带电的电极便在海水中产生电流，电流方向垂直于磁力线，正交于磁场，即图中中指的方向。这就是说，进入推进器管道中的海水处在一个磁场和一个与磁场正交的电场之中，那么管道中的海水就会受到一个与电场和磁场垂直的电磁力（洛伦兹力）的作用，即图中大拇指的方向。当这个力的方向向着船尾时，海水

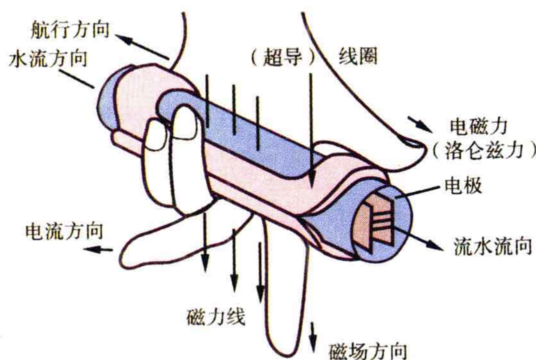


图10.3　超导磁流推进器原理



将向船尾方向运动。那么，海水的运动给船体一个反作用力，使船体向前运动。

在这种推进器里，是因为海水带电后受到电磁力向后流动而产生向前的反作用力推动船只前进。所以又称它为“超导磁流体推进器”。

这种设计的绝妙处在于：首先，它与普通的螺旋桨推进器相比，没有螺旋桨旋转所产生的涡流，因而大大减小了水涡流形成的阻力，从而可获得极高的速度。所以，8018号普通螺旋桨潜艇无法追上它。

其次，它既没有电动机，又没有螺旋桨。由于没有这些机械传动设备，因而它的噪声和振动都大大减少，真正实现船舶的安静航行。在潜水航行时更加不易被发现。所以，8018号潜艇上的微声监测器发现不了它。

第三，由于不用螺旋桨，所以不需要增加海水密封装置。

最后，由于使用超导磁体，才使这种设计成为可能。

因为从原理上讲，这种“电磁推进器”用普遍常规磁体也是可以的。但是，海水的导电率比较低，必须要有很高场强的磁体，能够产生5万高斯以上的磁场强度，才能产生大的推动力。目前，一般使用的常规铁芯电磁铁仅能达到2万高斯的磁场强度，要达到5万高斯，体积就会很大，潜水艇内那么小的空间如何放得下；而且常规磁体不是超导持续电流产生的，因而需要连续供电，这就不可行了，总不能用一根长长的导线从岸上给艇上的磁体供电。这一切问题，只要用超导体材料，制作超导磁体就解决了。



从上述种种优点来看，开发超导电磁推进船的关键在于能否找到既轻又符合条件要求的超导材料。

船舶电磁推进装置的设想，最早是美国赖斯博士提出的。1966年，美国综合电机公司根据赖斯的研究，首次制成了电磁推进船的模型船“EMS-1”。但使用的铜质线圈磁场强度只达到150高斯，没有取得什么有用的资料。

1976年，日本神户商船大学制成了超导磁体的电磁推进船的模型船，在世界上第一个证实了这种电磁推进船是可以造出来的。1979年又制成一艘超导模型船“ST-500”，全长3.6米，重700千克，在船底安装正、负电极，装备的超导体电磁线圈用铌钛合金制造，在海水中可产生2万高斯的强磁场。启动后，超导体制成的持续磁场，能够推动模型船以每秒1米的速度前进，完全没有振动和噪声。如果改变电流方向，船就会向后倒退。船的推进力，随电流的强弱变化而增加或减少，控制十分简便。

2008年8月，据报道，世界上第一艘以超导磁体作



图10.4 日本研制的超导电磁推进船“大和1号”



为行驶动力的超导电磁双体推进船在日本建成。这艘命名为“大和1号”的实验船（图10.4）船身为铝合金材料，船长30米，宽18米，高8米，自重280吨，排水185吨，航速每小时15千米。双体船的推进系统装有电磁铁，装在该船浮筒的水筒部。海水流入水筒，带电的电极便在水中产生电流。这个时候，超导磁体产生的磁场同这一电流相互作用产生的电磁力把水从水筒的末端作为高速水流喷出，反作用推动船体前进。增加磁场强度的方法是用超导电磁体，放在液氦里冷却。但目前要达到20万高斯的强度，必须寻求更有效的超导材料。

我国从1996年开始，由中国科学院电工研究所从事超导磁流体推进技术的研究，已经研制成功世界上第一艘超导螺旋式电磁流体推进实验船（HEMS-1）（图10.5）。该实验船于2000年获中科院科技进步二等奖。1999年中国科学院电工研究所和日本神户商船大学开展合作研究试验，中方承担了核心部分：磁流体推进器的研制。结果，磁流体推进器性能试验结果



图10.5　中国科学院电工研究所研制的磁流体推进实验船



表明：推进器最高电效率为40％，最大电磁力密度为每立方米20 000牛顿，其技术性能指标比“大和1号”提高了近10倍，是目前世界上磁流体推进技术在试验研究中所达到的最高参数。这次试验的成功，确立了我国在该领域的国际先进地位。

不过，最值得自豪的还是电工研究所和有关国防部门共同合作完成的“超导磁流体推进器潜艇”（图10.6、图10.7），在2008年11月北京的一个专门概念艇展示会上，引起了大批海军将、校军官的极大兴趣和驻足品评。他们说，要是中国能早日完成领先世界的“超导磁流体推进器”潜艇，那么就能摆脱目前中国海军，特别是潜艇、核潜艇噪声大、航速慢的桎梏，这是引导世界潮流的未来之艇。这就是本书这一节开头所引的那篇科学小说里所说的那种潜艇。

正在试验阶段的这艘潜艇，在强大的电磁力作用下，海水旋转着向后高速运动，再经出口导流器变为平行水流后通过喷口向艇尾喷射，推动潜艇前进。由于设置了6个螺旋型磁流体推进器，每一个推进器都是独立的，因此任意改变其中某几个推进器的推力大小，即可改变潜艇航行状态，实现左转、右转、上浮、下沉等运动姿态。

这种全新的推进方式将使潜艇在战术、技术性能上发生质的飞跃。只要艇员的身体素质和艇内的生活用品允许，磁流体潜艇将拥有无限的续航能力和自持力；只要艇体强度承受得住，就可在任意深度航行；更为重要的是，这种潜艇具有空前的安静性和水下高速航行、高速机动能力，成为真正意义上的潜艇，只要目标在攻击范围之内，那么任何猎物都难逃脱它的手掌。




图10.6 我国自行设计的超导磁流体推进器潜水艇

这一信息，引起了包括设在欧洲的著名国际海军潜艇联盟协会（NSL）在内的国际潜艇界的关注。NSL学会亚洲海军发展顾问约翰博士说：采用磁流体喷水推进技术，将会极大增加他们新型潜艇的水下生存与对抗反潜探测能力。第一代潜艇，中国可以做到“最小范围的被探测几率”。第二代潜艇，中国可以做到“难以被探测的能力”。而他们的第三代潜艇，将被用于更加深的水域，并且属于无法探测阶段。

他说，中国专家的介绍使我们感到震惊，看来中国海军已经拥有自主开发新潜艇技术的能力。我个人相信他们所拥有的潜艇制造技术，同时这是完全出自中国人自己的发明与创造。

专家预测，到21世纪30年代，磁流体推进装置将在潜艇上得到实际应用。从时间和科研基础上讲，中国如果能够继续加大发展超导磁流体技术，则有可能比美国领先10~20年，在“超导磁流体推进器”研究方面，中国的实验及研究成果显然已经领先了一大步。

就在西方媒体一片哗然，把中国超导磁流体推进器潜艇炒



得沸沸扬扬，具体实在地感到崛起的新中国海军，正在走向大洋深处，向他们的海上霸权提出挑战的时候，西方媒体万万没有想到，磁流体推进器潜艇的主要技术——超导技术，正在为中国炮兵研制新式大炮发挥作用，再次引起西方的震撼，那就是：中国炮兵研制的不需要发射用火药的大炮首次实弹试射成功！

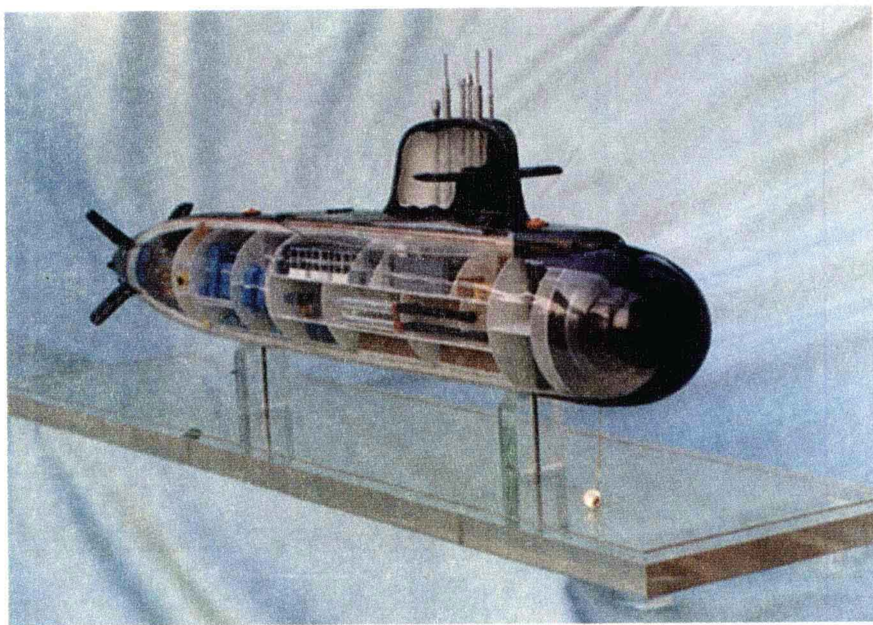


图10.7　我国自行设计的超导磁流体推进器潜水艇内部结构模型



11 不需要发射用火药的大炮

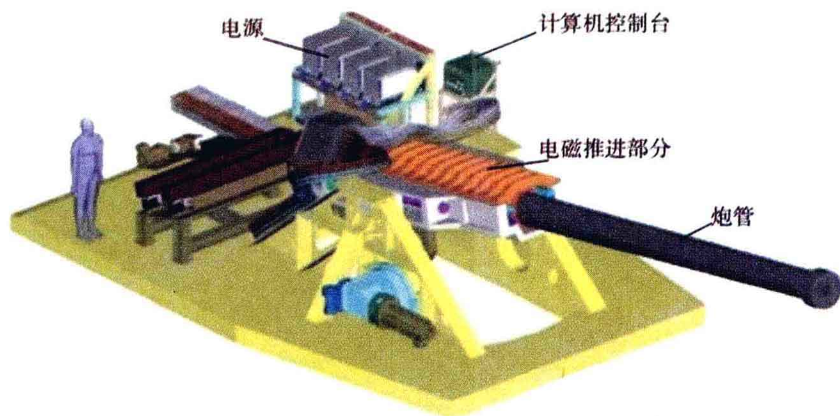


图11.1 我国自行设计的超高速电磁炮模型

不需要发射用的火药，那炮弹能打得出去吗?

能！这是运用超导技术制造的电磁炮！

2006年8月，中国军方在内蒙古炮兵靶场对超高速电磁炮进行了首次实弹射击试验，25千克的弹丸、以每秒3千米以上的速度被发射到250千米以外的预定区域，实弹射击试验获得圆满成功（图11.1）。目前，中国设计师正在对超高速电磁炮进行改进，主要是加大弹丸的发射重量，以达到发射50千克级以上的制导炮弹水平。据媒体报道，美国人在电磁炮试验中仅仅能把



3千克的弹丸加速到每秒2.5千米，与此相比，我国电磁炮的研制可以说是后来居上了。

我国超高速电磁炮研究已达17年之久，获得突破的时间在2001年底。

2001年5月，北京有色金属研究总院在京宣布，其承担的国家“九五”重点科研项目“大面积双面高温超导薄膜”通过国家评审验收。北京有色金属研究总院是中国唯一将大面积双面超导薄膜应用于器件的材料研究单位，具有稳定提供一定数量大面积优质双面薄膜的能力，实现了中国高温超导薄膜产业化生产。随即，这项技术被应用于电磁领域，使中国超高速电磁炮研究突飞猛进。

经过17年的研究和实验，中国的新概念武器“超高速动能电磁炮”的研制于2006年进入最后试用阶段。中国超高速电磁炮研究，虽起步稍晚，但在其先进的超导技术支持下进展迅速，现在，世界上一些主要国家，如美、俄等，都在研究这种新概念武器，中国电磁发射技术并不比他们落后，更有可能首先拥有和使用这种超高速动能武器。

“电磁炮”与传统的大炮不同，它不是靠火药燃烧的气体压力作用来推动弹丸，而是利用电磁系统中电磁力来推动，其作用时间长得多，推动的弹丸大、射程远，最高可以达到每秒50千米的超高速状态。这是常规武器望尘莫及的，具有战略性武器的功能。

电磁炮又可分线圈炮、轨道炮和重接炮三种。



电磁炮的结构和原理

电磁炮听起来很神秘，其实它的结构很简单。它主要由电源、高速开关、加速装置和炮弹四部分组成。

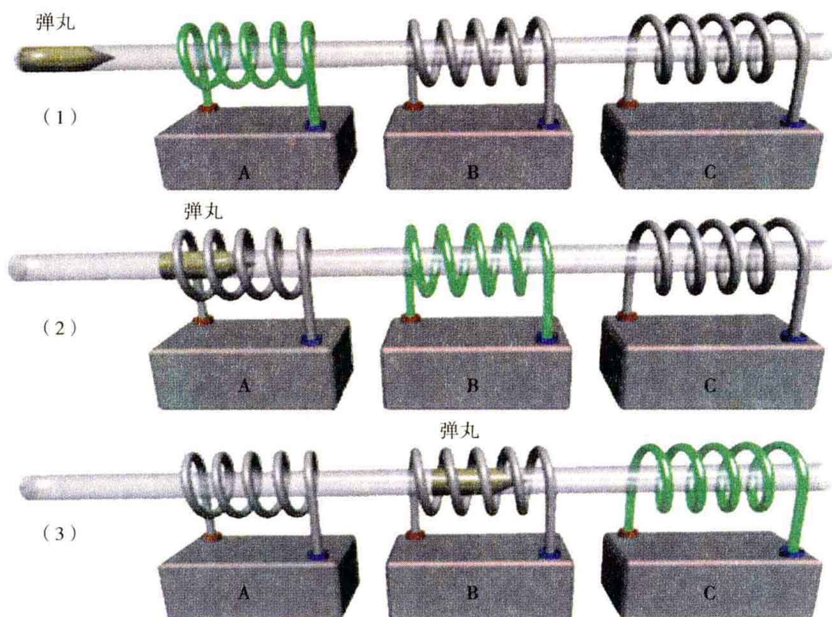


图11.2　电磁炮之一：线圈炮的发射原理（绿色表示通电）

线圈炮的发射原理如图11.2所示。线圈炮的发射部分由加速线圈和弹丸线圈构成，弹丸线圈在弹丸上，加速线圈由多个线圈组成，固定在炮管中。在发射时，首先给加速线圈A通入交变电流，即图11.2中（1），那么线圈A就会产生交变磁场，这个磁场立刻就会在弹丸线圈中产生感应电流，感应电流的磁场与加速线圈电流的磁场互相作用，产生电磁推动力，物理课本上叫洛仑兹



力，使弹丸沿着炮管向前运动，接着线圈B通电、线圈C通电，弹丸就因为在炮管里不断地受到电磁力的作用而被加速，最后发射出去。

轨道炮的发射原理如图11.3所示。轨道炮没有炮管，是由两条平行的长直导轨组成的。弹丸就放在轨道的底部，当两轨接入电源，强大的电流从一导轨流入，经弹丸从另一导轨流回时，在两导轨平面间产生强磁场，通电流的弹丸就会受到电磁力的作用，以很大的速度射出。

重接炮是一种多级加速的无接触电磁发射装置，没有炮管，但要求弹丸在进入重接炮之前应有一定的初速度。其结构和工作原理是利用两个矩形线圈上下分置，之间有间隙，长方形的“炮弹”在两个矩形线圈产生的磁场中受到强磁场力的作用，穿过间隙在其中加速前进。

重接炮是电磁炮的最新发展形式。

和电磁炮同属于“电炮”的还有“电热炮”。电热炮的原理完全不同于电磁炮，其结构也有多种形式，最简单的一种是采用一般的炮管，管内设置有接到等离子体燃烧器上的电极，燃烧器

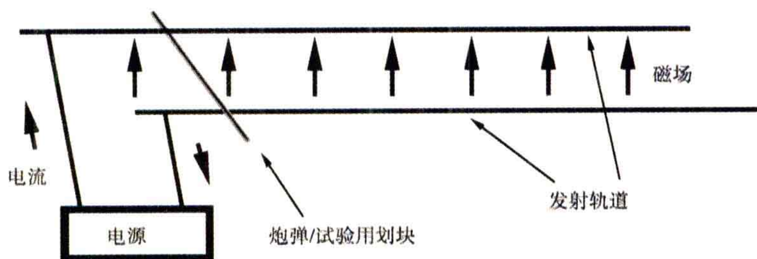


图11.3 电磁炮之一：轨道炮的发射原理图



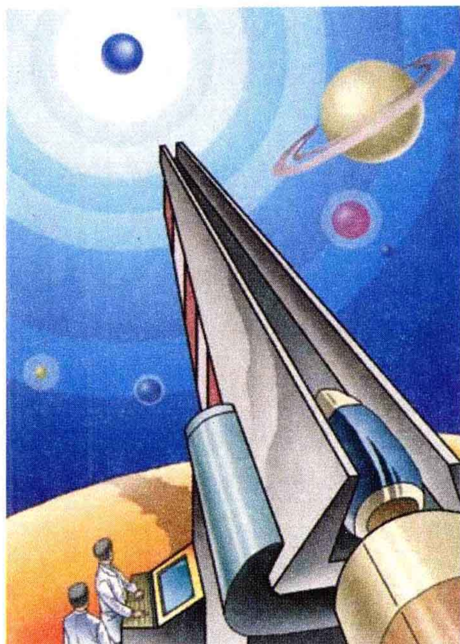


图11.4 电磁炮–轨道炮构想图可用于攻击低轨道航天器

安装在炮后膛的末端。当等离子体燃烧器两极间加上高压时，会产生一道电弧，使放在两极间的等离子体生成材料（比如聚乙烯）迅速变成过热的高压等离子体来推动弹丸，最高射速每秒约3千米，比传统火炮每秒2千米速度快，可作为战术武器使用。

电磁炮的特点

首先，电磁炮是利用电磁力所做的功来作为发射能量，无污染，不会产生强大的冲击波和弥漫的烟雾，因而具有良好的隐蔽性。可以根据目标的性质和距离，调节、选择适当的能量来调整弹丸的射程。可在一个多级发射器中同时推进几个射弹，大大增强战斗威力。它不仅可发射克级重量的小弹头，还可发射吨级重量的超级射弹，令打击威力和穿透力均大大增强。

其次，电磁炮发射稳定性好、初速度高、射程远，发射过程



全部由计算机控制，弹头又装有激光制导或其他制导装置，具有很高的射击精度。

第三，从发射成本来看，常规火炮发射火药产生每兆焦耳的能量需要10美元，而电磁炮只需0.1美元。电磁炮还可省去火炮的药筒和发射装置，故而重量轻、体积小、结构简单、运输以及后勤保障等方面更为安全可靠和方便。

电磁炮的用途

作为发展中的高技术兵器，电磁炮的军事用途十分广泛：

第一，用于天基反导系统。

电磁炮由于初速度极高，可用于摧毁空间的低轨道卫星和导弹，还可以拦截由舰只和装甲车发射的导弹。因此，在美国的“星球大战”计划中，电磁轨道炮成为一项主要研究的任务。

第二，用于防空系统。

美军认为可用电磁炮代替高射武器和防空导弹执行防空任务。美国正在研制长7.5米、发射速度为500发／分、射程达几十千米的电磁炮，准备替代舰上的“火神—方阵防空系统”，可以用来打击临空的飞机，或远距离拦截空对舰导弹。

第三，用于反装甲武器。

美国的打靶试验证明，电磁炮是对付坦克装甲的有效手段。发射质量为50克、速度为每秒3千米的电磁炮弹，可穿透25.4毫米厚的装甲。有关资料还报道，用一种电磁炮做试验，完全可以穿透模拟的T-72、T-80坦克的装甲板。由此可见，电磁炮具有很强的穿透能力，是非常优良的反装甲武器。据报道，英国正在积



极研制用于装甲车的防空电磁炮。

第四，用于改装常规火炮。

随着电磁发射技术的发展，在普通火炮的炮口加装电磁加速系统，可大大提高火炮的射程。美国利用这一技术，已将火炮射程加大到150千米。

除了军事用途外，电磁发射技术在航天领域可用作地对空的定向发射，也可推动航天器进行轨道转移。在交通领域，用电磁发射原理制造电磁列车，使用原铁路轨道，其成本仅是磁悬浮列车的四分之一。在工业方面，可用其原理制造电磁抽油机，代替目前油田的机械抽油机，从而大幅度提高抽油效率及降低成本。

正因为电磁炮有这么多用途和优点，世界各国都十分重视。近几十年来，世界各国都在努力研制电磁武器，其中包括美国和俄罗斯，电磁武器竞赛实际上已经开始。

美国海军早就开始试验研究。美国海军在网上公布了一个电磁炮发射的视频片段。图11.5是视频上显示的发射瞬间，图11.6



图11.5 美国海军电磁炮的发射瞬间



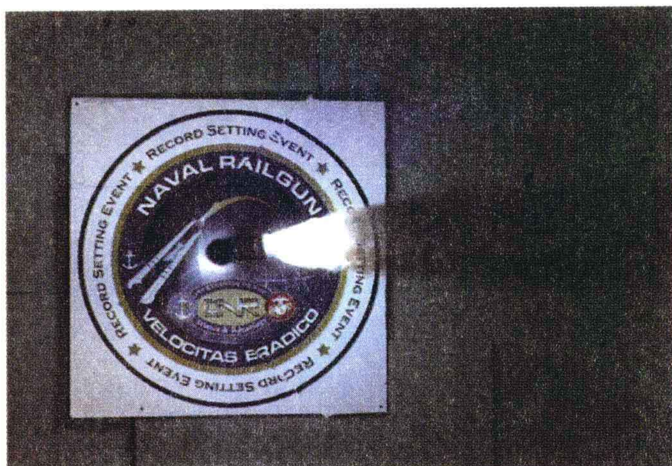


图11.6 美国海军电磁炮炮弹击中目标的瞬间

显示的是电磁炮炮弹击中目标的瞬间。

不过，俄罗斯的专家通过视频片断发现了美军电磁炮试验中的一个细节：炮弹出膛时有火云，说明这不是纯电磁炮。可能先是使用普通火药发射炮弹，之后再击发第二助推力，形成加速度，但具体内容无法根据视频判断。

现在，无论是美国，还是俄罗斯，都无法在现代战舰中实际使用这种武器，主要是动力不足。为此，需要制造新型动力装置的新一代战舰，保证舰艇航行和电磁炮发射的充足动力。

那么，能够装备新一代战舰的“新型动力装置”是什么样的装置呢？说到这里还是离不开超导：超导电机！因为只有超导电机才有可能提供这么大的动力。据报道，美国海洋实验室牵头，已经开发的一种数千吨级的超导电力推进船，就是以超导电机来带动螺旋桨产生动力的。

下面，我们就来说说超导电机。



12 超导电机

电机，初中物理课上讲过，它是发电机和电动机的合称。

它们一般是由一个定子和一个转子组合而成的。定子是静止不动的励磁线圈，转子是可以旋转的电枢线圈。如果给转子供电，那么通了电的电枢线圈就会在定子励磁线圈产生的磁场中受到磁力的作用而转动，这就是电动机。反过来，我们通过机械动力来转动电枢，则电枢同样在励磁线圈产生的磁场中产生感应电流，这就成了发电机。

电动机也好，发电机也好，这里有电磁线圈，超导就能派得上用场。于是，利用超导磁体研制的电机就诞生了。

超导电机中有直流超导电机、交流超导电机、磁流体发电机，等等。

先说说直流超导电机。图12.1是一个圆盘式超导单极直流电机的原理图。它实际上只能说是一种半超导电机，因为它只有静止不动的定子励磁线圈是超导的，而旋转的电枢，仍然是用常规导体来制作的。

图12.1是一个剖面图，上下各画着一个带有方格、并标示为“超导线圈”的就是一个圆环形定子，是由超导材料绕成的，被放在真空绝热容器里，防止漏热，不要破坏超导电性。

图中的中间部分是电枢，就是常说的“转子”，它由一个



旋转圆盘和内外电刷组成。处于室温条件下。

和普通电机一样，它通过内外电刷给电枢供电，电枢就会在超导线圈产生的磁场中受到旋转力的作用而转动，这是超导电动机。反过来，通过机械转动电枢，则电枢同样在超导线圈产生的磁场中产生感应电流，这是超导发电机。

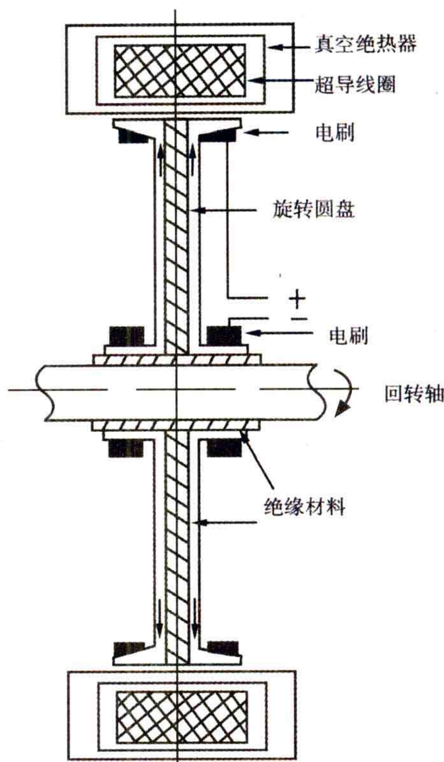


图12.1　直流超导单极电机原理图

这似乎并不稀奇，和普通电机一样，何必又要用超导材料来做定子线圈呢？

当然，也可以用常规磁体来做定子励磁线圈。但是，我们用超导励磁线圈，由于具有超导电性，没有电阻，因而没有电阻消耗电能，只要输入较小的电功率，就可以产生很强的磁场，还可设法撤去电源，使之成为持续电流，而励磁线圈就成了“永久磁体”，不用再输入电源就可以连续使用了。也就是说，这时只要维持住定子线圈的低温条件，保持超导状态就不再耗费电能了。



英国的国际研究发展公司在开发超导单极电机方面，一直发挥着先驱的作用。早在1966年就制成了一台50马力（36.75千瓦）的试验机，1971年制成了一台3 250马力（2 388.75千瓦）的超导单极电机，在发电厂带动冷却水泵，进行多年负载运行，证明是成功的。

超导单极电机，由于不像交流电机，没有换向问题，极限功率可达10万千瓦以上，大容量电机效率可达98%。和常规直流电机相比，体积小、重量轻、噪声低，且具有很强的过载能力，克服了常规电机体积大、效率低、极限功率低的局限，是建造高航速、低噪声船舶的好动力。特别是它提高了船舶的灵活性和隐蔽性，在军用舰只上具有重要使用价值。

据报道，美国正在研制超导单极电动机和单极发电机组用于驱逐舰上。英国正在研制5.15万千瓦的超导单极电动机用于破冰船上。

超导交流电机也有人在研究，只是因为迄今发现的超导材料，都是通过直流电时才没有能量损耗，通入交流电后损耗很大，因而限制了交流超导电机的发展。新的超导材料的发现，使交流超导电机的研究又热火起来。

图12.2就是一台交流高温超导电机。它是一种3对6极的高温超导船用推进电动机。

它的转子与传统电机的转子完全不同，其励磁绕组是由高温超导材料绕制而成的，运行在封闭的低温（35～40K）环境中。转子总成包括：高温超导励磁绕组、支架结构、冷却回路、低温恒温器和电磁屏蔽。该低温制冷装置模块设置在一个固定的



构架上，氦气用来冷却转子上的部件。

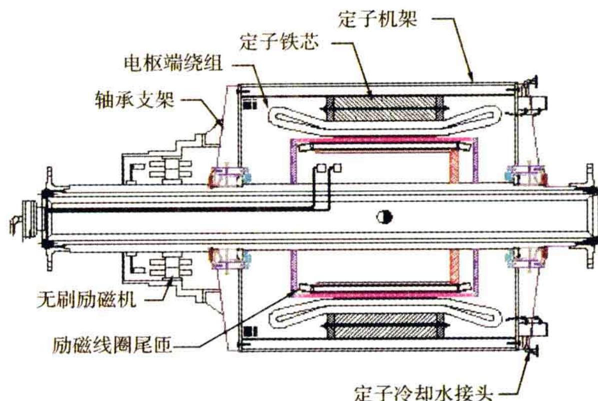


图12.2　交流高温超导电机原理图

定子绕组是经过改进的铜质导线绕组。定子总成包括：交流定子绕组、机座铁芯、定子绕组支架、轴承和机壳。定子绕组不放在常规的铁芯齿中，因为它们由高温超导绕组产生的强磁场而处于饱和状态。定子由淡水冷却。

高温超导电机之所以如此高效，是因为高温超导线材可承载比相同尺寸和重量的铜导线高140倍的电流，更大的电流意味着更强大的动力。尽管维持超导所需要的低温环境会消耗能量，但低温冷却系统所需的功率相当低，大约为常规铜质导线转子的10%。

为什么一定要发展交流超导电机呢？

因为用常规材料绕制的线圈作转子，最大的缺点就是线圈上的电流密度不能太大，电流过大，会烧毁转子的线圈。为此，就加粗导线。

同时，为了防止被击穿，线圈的导线之间要填充足够的绝缘材料。

随着单机容量的增大，即每台发电机发电量的增大，由于上



述两个原因，转子的尺寸势必越做越大。尺寸过大，多用点材料倒是小事，问题在于转子是高速旋转的，旋转的速度越快，转子上各部分受到的离心力就越大，甚至会大到把转子拉碎。

据理论计算，单机容量达到100万千瓦级以上时，转子尺寸过大，高速旋转起来各部分受到的离心力已经达到材料的极限强度了，离心力会把转子拉得粉碎。这就是说，用常规磁体制作的交流电机其单机容量已经到顶了。

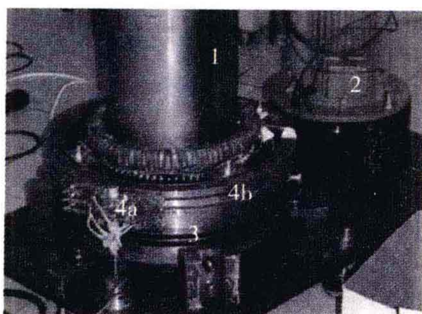


图12.3　美法联合设计的新型超导电动机
1—固定的低温保持器；2—感应电动机；3—带子；4a—电刷，4b—环

可是，随着电力消耗量的猛增，单机容量已经增加到1 000万千瓦。这么高的单机容量，用常规磁体是不行的。

那么，自然要用超导材料来绕制转子线圈了。由于超导体可以通过很大的电流，而且绝缘要求低，这样转子的体积就可以比常规电机转子的尺寸大大减小，加上在转子线圈中的电流是直流的，不会产生超导交流损耗，所以，完全可以用超导材料来绕制交流电机中的转子线圈。


图12.4　日本石川岛重工、住友电气等产学联合研究小组开发的通过用液氦冷却的超导线圈来驱动的365千瓦的同步超导电机

从理论上计算，超导交流电机可以将单机容量提高



5~10倍，体积仅为常规电机的一半，重量为常规电机的三分之一，效率可达99.5%。一台100万千瓦的电机，预计可节约电力近1万千瓦，还可以改善电机的稳定性。

现在，世界上许多国家都在开发交流超导电机的技术。比如，美国、德国、法国、韩国和日本也都在开发船用高温超导电动机（图12.3、图12.4）。目标都是将高温超导旋转电动机作为常规船用电动机推进替代产品来研发的。

日本的住友电工还试制成功了用超导马达驱动的电动汽车（图12.5）。

尤其是美国已进入36.5兆瓦、每分钟180转的高温超导电动机和50兆瓦、每分钟3 600转的高温超导发电机的设计开发工作。

近年来，我国电机工业也加入到试制超导电机的行列中来。

至于更先进的超导电机，应该是磁流体发电机。它是一种没有转子的发电机。但是，它的关键部件仍旧离不开超导磁体。



图12.5　日本住友电工试制的用超导马达驱动的电动汽车（左）和超导马达（右）





13 没有转子的发电机

发电机没有转子，靠什么来产生电流呢？原来它是靠能够流动的导电体高速流过磁场来发电的。形象一点说，这种发电机是靠“流子”来发电的。

这是什么人想出的高招呢？

早在1832年，英国物理学家法拉第就设想过。在研究电磁感应现象时，他想，既然固体导体在磁场中运动会产生感应电动势，那么流动着的导体流过磁场时也应当能够产生感应电动势，有了感应电动势，接成闭合回路不就有了感生电流了么。这就是最初的磁流体发电的设想（图13.1）。

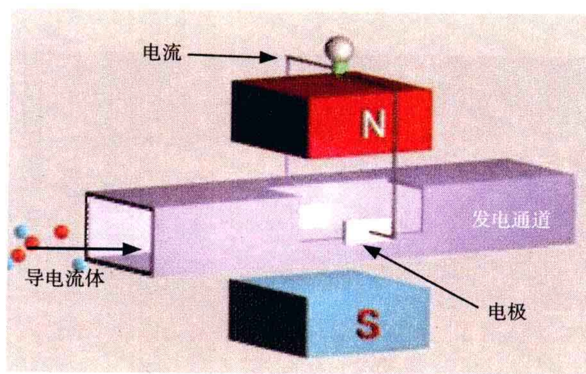


图13.1　法拉第设想的磁流体发电原理



这种设想是正确的。但是，由于当时条件的限制，法拉第未能实现用导电流体通过磁场来产生强大电流的愿望。

直到1959年，法拉第的设想才得以实现：美国阿夫柯公司埃费特研究室建造了世界上第一台磁流体发电机，首次用磁流体方式发电成功，点亮了几百盏电灯，震动了全世界。

磁流体发电的原理很简单。如图13.1所示，当导电流体从发电通道中通过时，流体流动方向是从左到右，这时磁场方向是从上到下，两者相互垂直，那么在同时垂直于流动方向、磁场方向的方向上，也就是图中显示的从里到外的方向，就自然会有感生电动势产生，接上电器就会有电流通过。

实际的磁流体发电机，是利用煤炭、天然气、重油等燃料，经燃烧并设法使其电离形成高温等离子体的导电气体，让它们在发电通道中高速流动，通过强磁场，切割磁力线，产生感应电动势来发电。因为流动的是等离子体，所以又称其为“等离子体发电技术”。

这是一种十分先进的发电技术。它和火力发电相比，具有以下优越性：

第一，发电综合效率高。通常的火力发电，需要经过四种能量的三次转换：首先是煤的燃烧，将化学能转换成热能；然后是将水加热成蒸汽，蒸汽膨胀以推动涡轮机转动，将热能转换成机械能；最后再由涡轮机带动发电机，将机械能转换成电能。在磁流体发电中，就没有这么多次的转换，它就一次把热能直接转换成电能。所以被称之为“直接发电”。磁流体的热效率可以从火力发电的30%～40％提高到50%～60％，预计将来



还会再提高。

由于磁流体发电跳过了热能转换机械能这一过程，使得磁流体发电机本身没有转动部件，因而从理论上讲，它的单机容量是没有极限的。同时，也因为没有转动部件，磁流体发电机的发电通道中流过的导电流体的温度可以高达3 000摄氏度，而在一般的发电机中温度不能超过800摄氏度。这就可以充分利用热能，提高热循环的效率。

第二，启动快。在几秒钟的时间内，磁流体发电就能达到满功率运行，这是其他任何发电装置无法相比的。因此，磁流体发电不仅可作为大功率民用电源，而且还可以作为高峰负荷电源和特殊电源使用，如作为大型风洞实验的电源、激光武器的脉冲电源等。

第三，对环境污染少。磁流体发电虽然也使用煤炭、石油等燃料，但由于它使用的是细煤粉，而且高温气体还掺杂着少量的钾、钠和铯的化合物等，容易和硫发生化学反应，生成硫化物，在发电后回收这些金属的同时也将硫回收了。从这一点来说，磁流体发电可以充分利用含硫较多的劣质煤。

磁流体发电没有高速旋转的部件，噪声污染也很小。

由于磁流体发电时的温度高，可以将磁流体发电和一般火力蒸汽发电相结合，组成磁流体——蒸汽联合循环发电，让磁流体发电放在蒸汽发电的前面，这样高温气体先通过磁流体发电机发电，然后将该机排出的尾气通入蒸汽锅炉，可再产生蒸汽发电。这样一般的火力蒸汽电厂的发电效率可从40%提高到60%。

磁流体发电机发电功率的大小，与发电通道中磁场强度的平



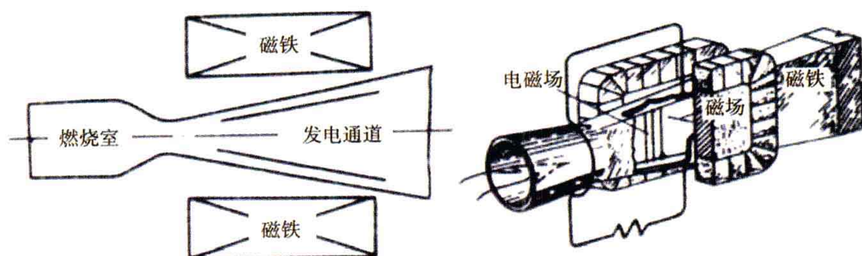


图13.2 实际工程中的磁流体发电装置

方成正比。因此，提高磁场强度对提高输出功率有重要意义。

一个真实的磁流体发电装置，由四个部件组成（图13.2）：

①燃烧室：通过矿物燃料与氧气或压缩预热空气的燃烧产生高温等离子体，达到磁流体发电所要求的温度。

②发电通道：在此通道内等离子体以高速穿过磁场，感应出电动势，再由镶在通道两侧壁上的电极引出直流电流。

③磁场：用高性能的磁体产生，作用在等离子体上。

④工质：即工作气体。通常使用煤、石油、天然气等燃烧气体、惰性气体或碱金属蒸气。若使用燃烧气体，为获得足够的电离度，需掺入少量添加剂。这种添加剂又称为“种子”，一般是选用钾、铯等碱金属化合物，添加量约为总质量流的1%。这样，可以大幅度降低发电温度，获得足够的电导率。

通过计算和实验表明，实用的磁流体发电装置，只要使用6万高斯以上的强磁场，磁体励磁功率能够保持在一定水平上，磁流体发电站就可以有大容量的净功率输出。那么符合上述条件的高场强、大空间的磁体从何而得呢？

如果用常规导体来绕制磁体的线圈，运行时耗费的电能相当



大，磁流体发电机发出的电能将有相当大的部分为自身磁体所消耗，而且也影响场强的进一步提高，如果达不到4~5万高斯是不行的。如果单机容量小于2万千瓦，这种磁流体发电机输出的功率还没有磁体消耗的功率大。这种“倒贴”的发电机当然没有实用价值了。

怎么办？还是一句话：采用超导磁体，问题就可以解决了。大空间、高场强、耗能少，磁流体发电中磁体的这些要求，正是超导磁体的特点。

最早用在磁流体发电机上的超导磁体是美国AVCO公司建造的鞍形磁体。

为了绕制这种磁体，他们可费脑筋了。他们用铜制成宽1.27厘米、厚0.101 6厘米的铜带子（图13.3）。

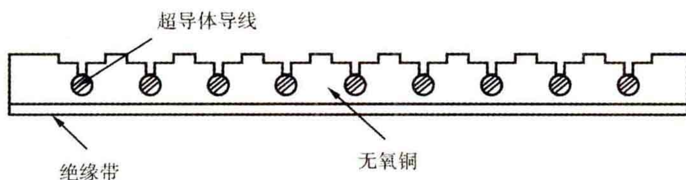


图13.3 特制的含有超导材料的“铜带子”横断面示意图

在这薄薄、窄窄的带子上开着9个凹槽，将9根直径只有0.025 4厘米的超导金属线嵌入槽中，并在没有槽的那一面、沿着某一边涂上宽1.19厘米、厚0.018厘米的环氧树脂作绝缘层，然后再用这种“带子”来绕磁体线圈。因为绝缘层比铜带窄一点（1.27>1.19），即还有0.08厘米宽的铜带没有涂上绝缘层而暴露在外。这时将整个线圈浸入液氦中去，就可以通过这暴露在外面的部分，使线圈保持低温。



一个鞍形磁体要绕10层这样的线圈。每两层为一组，放在铝框架上，构成一层组件，即两层线圈组成同轴状的圆筒。整个磁体由五层组件组合起来，外面安上13个铝制环箍，以保护线圈。把这种组合线圈套在特制的发电通道上就可以发电了。

不过，随着磁体的大型化，磁体自身的安全运行问题被提上了议事日程，不可忽视。比如，由于某种原因，线圈产生大量的热，使液氦迅速气化，氦气气压会因此迅速上升，以致发生爆炸事故。

于是，人们又设计出紧急断路装置（图13.4）。

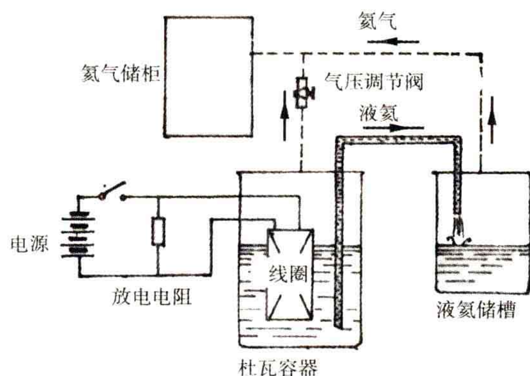


图13.4　磁流体发电机的紧急断路装置原理图

这种装置的作用原理：图13.4中的杜瓦容器中的线圈，是指发电机的绕组线圈，杜瓦容器是指为线圈冷却的装置。

如果线圈发热，杜瓦容器里的液氦就会被蒸发，氦气增多，氦气压增加，装置就利用这一压力将液氦从杜瓦容器内排到液氦储槽内。液氦的排出使线圈所在的容器内的氦气压逐渐恢复到正常态。同时，氦气压增加到某一值时又可以顶开气压调节



阀而进入氦气储柜，也可降低氦气压；而放电电阻还可以使线圈的一部分能量释放在容器之外，也可以起到保护作用。

美国是世界上研究磁流体发电最早的国家。1959年美国就研制成功了11.5千瓦磁流体发电的试验装置。60年代中期以后，美国将它应用在军事上，建成了作为激光武器脉冲电源和风洞试验电源用的磁流体发电装置。

日本和前苏联都把磁流体发电列入国家重点能源攻关项目，并取得了引人注目的成果。前苏联已将磁流体发电用在地震预报和地质勘探等方面。1986年，前苏联开始兴建世界上第一座50万千瓦的磁流体和蒸汽联合电站，这座电站使用的燃料是天然气，它既可供电，又能供热，与一般的火力发电站相比，它可节省燃料20％。

磁流体发电为高效率利用煤炭资源提供了一条新途径，所以世界各国都在积极研究燃煤磁流体发电。目前，世界上有17个国家在研究磁流体发电，而其中有13个国家研究的是燃煤磁流体发电，包括中国、印度、美国、波兰、法国、澳大利亚等。

我国于20世纪60年代初期开始研究磁流体发电，先后在北京、上海、南京等地建成了试验基地。根据我国煤炭资源丰富的特点，我国重点研究燃煤磁流体发电，并已经纳入国家863高技术研究发展计划。早在90年代初，在北京就建成热功率为25兆瓦的燃煤磁流体–蒸汽联合循环上游试验基地，连续发电2小时，峰值发电功率达130.8千瓦，燃烧室排渣率超过60％。

在上海，建成热功率为5兆瓦的燃煤磁流体–蒸汽联合循环下游试验基地，锅炉排气满足环保要求，科学回收率超过90％，



最大运行时间达60小时。时至今日，已全部完成12兆瓦燃煤磁流体-蒸汽联合循环试验装置初步设计。这标志着我国已跻身于该项高技术的世界领先行列。

目前，磁流体发电机制造中的主要问题是发电通道效率低，只有10%；通道和电极的材料要求耐高温、耐碱腐蚀、耐化学烧蚀等，实际所用材料寿命都比较短，因而磁流体发电机不能长时间运行。

同学们，你们注意没有，在上面说的所谓“磁流体”都是气体流体，那么，液体流体能不能发电呢？

回答是肯定的。液态金属一样可以用于磁流体发电。

最近，有人提出一种“液态金属波浪能磁流体发电”系统。它采用与波浪运动特性相匹配的液态金属磁流体发电机。这种发电机里把原来由气体流过的发电通道，改为一个密闭的“箱子”，“箱子”里充有液态金属。发电时，海洋波浪的往复运动直接驱动发电机里置于磁场中发电通道（箱子）内部的液态金属作往复运动，这种往复运动就相当于气体流体不断地流过发电通道，从而在发电通道内部产生感生电动势，连接上负载就可以输出电能。

在网上，我们还看到关于这一技术的专利：“一种单管双通道液态金属磁流体波浪能直接发电单元装置”的专利。

这种液态金属磁流体波浪能发电系统具有以下特点：

一是发电功率会随着工质的运动速度连续可调，同时可保持较高的发电效率。二是可采用高电导率的液态金属作发电工质，功率密度大，发电效率高。三是发电装置易于小型化，便



于移动和快速装卸.四是制造成本低廉，运行维护费用低，使用寿命长.五是无温室效应，利于海洋环保。

该技术在沿海村庄、海洋军事行动和海洋资源开发利用的电力保障等方面，具有独特的应用优势。

讲到这里，同学们可能会说，你讲超导有多大用途，从加速器到托卡马克，从超导电机到磁流体发电，不就是一个超导磁体吗？还能有其他用途吗?

当然有，超导磁体运用的是超导材料的超导电性，即零电阻。这零电阻性质还有一个奇妙的用途，那就是可以进行“零损耗”输电。



14 零损耗输电

同学们还记得2008年春天那场雨雪冰冻灾害吗，几百千米长的输电线路被冰雪压倒，千家万户断了电。那个时候你肯定会想，如果发电厂能够就修在用电的城市里该有多好啊！

是啊，发电站、发电厂总是离用电的城市很远很远。火力发电站越造越多，因为它们需要用燃料，所以只能造在燃料产地，比如煤矿、油田等；因为它们需要大量用水，所以只能造在江边、湖边、海边；水力发电站也只能造在有水力资源的地方，如江河峡谷里，总不能造在大平原的河流上；还有原子能发电站，它是一种原子核裂变反应的发电站，为了防止放射性物质的意外泄漏而危害人类，更是只能造在远离城市又有利于排除污染物的大海边。

所以，电能的远距离输送是无法回避的，剩下来的问题是如何尽可能地减少输电过程中的电能损耗。

这使我想起南开中学的小明给我说过的，他去年参加电力夏令营到三峡大坝参观时的那场关于电能输送讨论的事情。小明告诉我：

夏令营的夜晚是格外愉快的。同学们来到山坡上，有的坐在石凳上，远远地看着宏伟壮观的三峡大坝夜景，为中华民族造就这一人类奇迹而引以自豪；有的铺上草席，躺在上面，仰望



着满天的星斗，耳边听着不远处松树林里的阵阵松涛，任凭那水面上吹过来的凉风从身上掠过，海阔天空尽情地议论着，话题很快集中到三峡电站上来。

“听说，我们重庆也在用三峡的电。”小明说。

“不会吧。重庆离这里少说也有好几百千米，这么远……”大渝漫不经心地说了一句。

“真差劲，再远也没有问题，不是可以架输电线路吗！”

“不，距离越远，输电线路的电阻就越大，输电热损耗就越大，导体的电阻与它的长度成正比，这都不知道？”大渝毫不示弱。

“咳，你真糊涂，高压送电嘛。”输电距离确定之后，升高电压，就减小了电流，也就可以降低输电时的热损耗。导线通电之后产生的热量，与电流平方成反比，你忘记啦？”小明如同放机关枪一样回敬大渝。

夏令营的指导老师是一位姓李的大学教授，见他俩各执一端，争论不休，就插了上来，说：“你们的争论很有意思，都有一定道理。远距离输电确实存在热损耗，到现在也没有很好解决，而且输电距离越远损耗越大。”

“怎么样？”大渝得意起来。

“不过，我们不可能因为远距离输电有热损耗就不远距离送电。发电站不能修在用电的城市附近，这是不可改变的事实，远距离输电是不可避免的。目前，传统的解决办法就是提高送电电压。”

小明接上来说：“我知道，我国常用的输电电压是11万伏



和22万伏。国外已经向超高压方向发展。日本已采用50万伏，欧美还有采用75万伏的。”

李教授说：“是的。但是，这并没有解决根本问题。因为电压升高也只是使热损耗有所降低，并不能消除热损耗，而且输电距离一远，热损耗仍旧很大，据计算这种输电方法的损耗可达30%。”

“超导材料没有电阻，用超导材料做成输电线不是可以消除热损耗了吗？”另一个同学说。

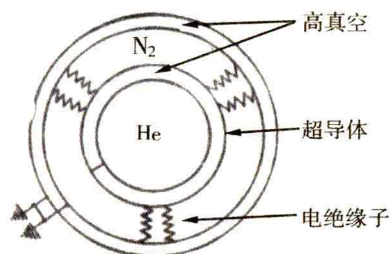
“超导材料必须在超低温下才可能具有超导电性，把超导材料做成的导线挂在高压输电线杆上，处在常温条件下，怎么会超导？”马上就有同学反驳。

“要是那样来超导送电，就要让整个地球表面温度冷到零下270摄氏度，人都冻成冰疙瘩了，还送电干吗？”小明俏皮地说，大伙儿都哄笑起来。

“是的。”李教授说，“小明说得对，是不能那样来超导送电。但是，超导输电一直是科学家们十分关注的课题。它们研究的超导输电系统的主要部分包括超导电缆、低温冷却系统以及超导电缆的端头和套管等。这里最重要的是研制一种特制的超导电缆。”李教授给同学们介绍了有关超导电缆的知识。

图14.1的下图是一种直流超导电缆的剖面图，上图是它的横断面示意图。它是用四层圆管子套在一起组成的。最外面的一层是用特殊的绝热材料制成的超级绝热层。它和第二层管子之间被抽成高真空，以防漏热。第二层和第三层之间用电绝缘子支撑起来，以防漏电。这两层之间充以液态氮作为冷却剂。





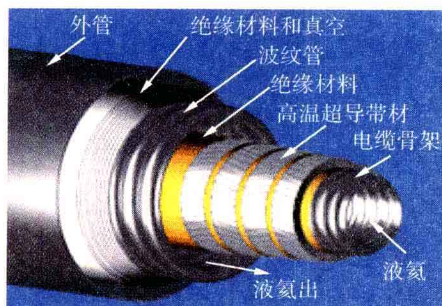


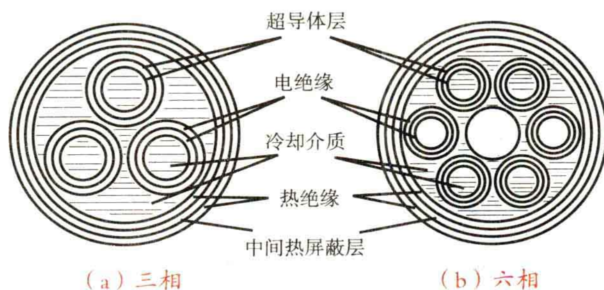
图14.1　直流单相超导电缆

再往里，第三层和第四层之间，又抽成高真空。第四层管子是用超导材料做成的，是空心的，里面填满了液态氦。通过这一系列措施，这根电缆中心的超导材料就因为处在液氦的低温条件下而具有超导电性了。

超导电缆分两大类：直流超导电缆和交流超导电缆。这两种电缆都是采用液氮、液氦冷却和真空绝热的办法，使电缆的超导材料处在5 K以下的低温。

图14.2（a）是交流单回路三相超导电缆，图14.3是它的实体图，图14.2（b）为交流双回路六相超导电缆。超导电缆采用这种同轴结构的原因，一是在于要提高超导电缆的工作电流需采取措施屏蔽这些电流产生的磁场，而同轴结构只在超导体





（a）三相　　（b）六相

图14.2　交流多相超导电缆横断面示意图

层之间存在磁场。二是超导输电不要求很高的电压就可以传输很大的容量，但交流超导输电受到静态稳定的限制，同轴结构可以减小线路的电感，使静态稳定极限大幅度增加。



图14.3　三相绞合超导电缆

这种电缆漏热，只有两种可能，一种是从液氮向液氦漏热，不过由于上面采取了那么多绝热措施，这种漏热即使发生，数量也会很小。还有一种是从超导电缆两端漏热，这也是有办法解决的。

其实，说起来也简单，既然是可能从两端漏热，那就从两端给它挡住。把发电的这一端放在低温下，和电缆一起冷却，这一端就不会漏热了。对于用电的那一端，可用一台超导变压器（图14.4），将超导变压器的初级线圈和电缆一同冷却，这一端也就没有漏热损耗了。



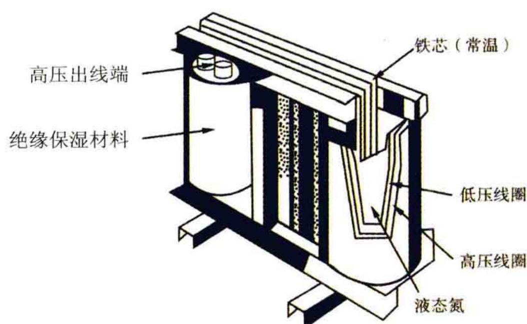


图14.4 超导变压器结构原理图

用这种电缆送电不能挂在电线杆上，而是要埋设在地下，方才安全可靠。

美国物理学家马梯阿斯在1978年曾指出："电能的输送将是超导体最重要的应用之一。超导体输送电能的实现可能比其他方面的应用需要更长时间，但毫无疑问，它的实现必然是全部超导技术中一个最具决定性的发展。几乎每隔十年，对电能的需要就会增长一倍。大约30%的电功率在输电线路上损耗掉了。鉴于目前采用的能量传输技术造成严重的损耗，必须最大限度地缩短产生电能和使用电能之间的距离。今天的电能输送似乎已走进了死胡同，为什么在输送电能、电动机、发电机、火车等方面不能大规模地利用超导电性呢？"这话说得是何等地好啊！所以，超导输电零损耗的诱惑，使得世界各国都在研制超导电缆。

早在20世纪70年代，美国布鲁克海汶实验室建有120米长的超导电缆线路进行输电试验。但是，由于在实际输电线路建设时，需要庞大的液氦低温系统，距离愈长难度愈大，因此研究工作进展很慢。

人们把由铋、锶、钙、铜和氧组成的超导电缆称作"第一代高温超导导线（BSCCO）"，由于成本太高，很难打进输电线市场。





图14.5　细小的超导体（右）与常规的铜导线（左）

后来，由于液氮温区新的超导材料的出现，极大地推动了超导输电研究的进程。基于液氮温区，由钇、钡、铜和氧组成的超导电缆称作“第二代高温超导导线（YBCO）”。但是，在很长一段时间里，这种材料难以拉制成长导线。在经过10年缓慢、但有成效的进展后，由YBCO组成的超导导线很有可能很快进入市场。自20世纪90年代以来，不断地传来1米的、40米的、100米的超导电缆试制成功的消息。其中，最长的、也是最成功的，要数奥尔巴尼的超导电缆。



图14.6　自2006年7月21日至今已正常运行930多天的奥尔巴尼超导电缆线路



低温世界漫游

2005年，美国政府决定在纽约州的州府奥尔巴尼（Albany）市，在连接赫德森河沿岸两座变电站长3.2千米道路的中途铺设350米的超导电缆（图14.6）。

这一工程由美国政府和纽约州出资，美国超导公司为项目经理，日本住友电工集团负责包括超导电线、终端和接头在内的整套超导电缆系统的生产和施工。由在全美拥有工业煤气发生装置远程监视网的英国BOC公司负责保持超导状态而必需的冷却。在纽约州电力公司的实际输电系统上铺设超导电缆，开始了进行实际输电的美、英、日三国的国际共同项目。

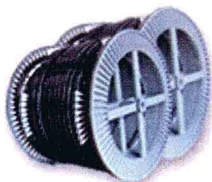
超导电缆是日本住友电工生产，2005年8月从神户港启航，横渡太平洋，通过巴拿马运河，于9月到达奥尔巴尼市（图14.7、图14.8）。


在神户港


正在通过巴拿马运河


登陆美国

图14.7　奥尔巴尼超导电缆的“神户–巴拿马–纽约”运输过程


超导电缆


超导电缆的接头部分

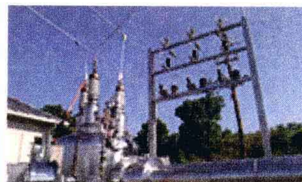
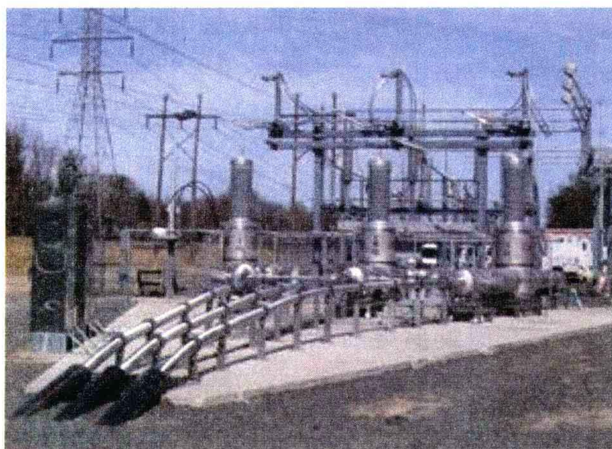

三相绞合型空中终端部分

图14.8　奥尔巴尼超导电缆及其接头部分、空中终端部分





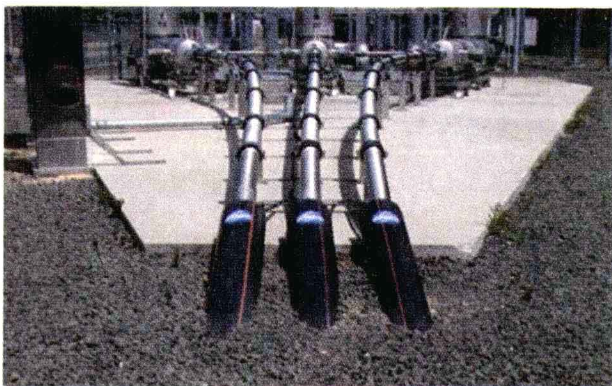


图14.9 美国纽约长岛电力局的实用超导电缆

在美国东海岸时间的2006年7月20日晚上9点，超导电缆在世界上首次与实用（地下）输电线路连接。该超导电缆到目前为止尚未发生任何故障，在无人状态下持续运转。

在8月2日举行的盛大竣工仪式上，纽约州的Pataki州长发表了演讲:“最近在昆斯地区发生的大停电由于配电系统故障，导致大量电力流失，一条干线的电缆被熔化。但是，从今天开



始，这样的事情将不会再发生了。这是因为在奥尔巴尼，超导电缆在世界历史上首次被适用于实用线路。”

2008年7月2日，美国超导公司，又正式在一个商业电网中部署了高温超导输电系统，这就是成为美国纽约长岛电力局电网一部分的超导输电线路（图14.9）。这条线路由三根138千伏的电缆组成。它于2008年4月开始通电，在满负荷运转时能够满足30万户家庭的用电需求。

美国超导公司希望使公用事业部门相信他们的技术就是电力输送的未来方向。他们宣传说，除了经济性，这种电缆的另一个优点是能够防止由电网短路造成的故障电流。超导体有一种天生的电流限制能力，一旦电流增强到一定程度就会失去超导性，而电阻恢复，电流就会衰减。

在日本，以古河电气工业为首的研究组宣布，他们已经完成500米长的超导线缆实地实验的全部预定实验。这是目前全球最长的高温超导线缆的实地实验。以住友电工为首的研究组也宣布，2010年度他们将在日本国内率先开始变电站超导输电实验。他们将在横滨市的变电站内铺设住友电工开发的200～300米的铋系超导电缆，向普通家庭及工厂输送电力。估计与使用普通铜电线相比，可将输电时的电力损失减半。

在我国，超导电缆还处于研究机构研制试验阶段。有：清华大学的340米铋系高温超导线，北京有色金属研究总院的高质量双面钇钡铜氧超导薄膜，中国科学院电工研究所的由8层共238根铋、银带材在不锈钢波纹管骨架上螺旋绕制而成的、6米长、2 000安培的高温超导带材，以及香港科技大学宣布成功开发出



全球最细的纳米超导线等。

还有南方电网公司的“大容量、35千伏级实用化超导电缆系统的研制及应用”项目，是国家“863”计划的专题项目。项目中首次使用了高温绝缘双层液氮循环冷却结构、导体混合式设计、积木式终端结构等创新技术，涵盖了电缆系统的设计、制造工艺和设备制造，形成了我国超导电缆系统安装、试验和运行维护的技术规范与标准。该项目研制的三相交流33.5米、35千伏/2千安的超导电缆，已于2004年4月19日在昆明普吉变电站投入运行，并于同年7月10日并网送电（图14.10、图14.11）。这一成果达到国际先进水平，表明我国在高温超导电缆研制技术方面跃居世界前列。

此外，中国科学院电工研究所与甘肃长通电缆公司等合作，研制成功75米、10.5千伏/1.5千安三相交流高温超导输电电缆，



图14.10 我国第一组33.5米超导电缆并网仪式在昆明普吉电站举行





图14.11 普吉电站的超导交流电缆正在安装



图14.12 75米三相高温超导交流电缆

也成功并网运行（图14.12）。

电，这东西的用途确实大！电车、电瓶车、电视机、电冰箱、电灯、电话、电动船、电动玩具……，几乎占据了人类使用的全部能源的一半还要多，一旦没有电，社会可真的会一下子瘫痪的。

可是，发电也太难了！输送电就更难了！那么多人都在研究怎样来输送电能，还要想着怎样才能做到“零损耗”输电。如果要是有一个装电的匣子，就像放衣服的箱子、盛水的瓶子那样，把深山峡谷里水电站发的电装在里面，就像运集装箱那样来运输电力，不就是很简单的“零损耗”输电了么？

是啊！要是有一个能够装电的匣子就好了！



15 装电的匣子

确实，有许多人都曾经致力于研究这种“装电的匣子”。于是，办法就一个一个被想了出来。比如，电容器、蓄电池等等。

电容器，是可以储存电能。但是，它充电时间很短，放电时间也很短，这样可以得到很高的电压，适合用于某些特定的场合。但是它不能以大电流的方式储存电能，而且还很容易漏电，难以避免电能的损耗，不适宜用于长时间储能的场合。

蓄电池，确实是地道的“装电的匣子”。它可以获得大电流，也可以较长时间储能，应用范围很广。但是，充电、放电的时间都很长，所以在一些场合下也不适合使用。

说来说去，应该有一种既能提供高电压、又可提供强电流、



图15.1 要是有一个能够把电装起来的匣子有多好



充电时间不长、不漏电、无损耗的方法，那该有多好！

超导电技术被发现后，人们就自然想到用超导线圈来储电。

超导储电，或者说超导蓄能，就是我们上面希望得到的那种方法。它有许多优点：第一，超导线圈在超导态时，没有直流电阻，所以，在储能线圈中流动的可以是持续电流，不会损耗。那么，只要使超导线圈始终处于低温条件下，超导态不会被破坏，一次储存的电能就可以长时间地、无损耗地保存下来。这可是电容器所望尘莫及的。

第二，超导线圈是通过电流来储存电能的，可以获得大电流，如果急速放电可以产生高电压。这就有了电容器、蓄电池两种装置的长处。

应用超导线圈来储存和释放电能的方法，其原理并不复杂。如图15.2所示的电路，就是一种最简单的超导储能装置原理图。在这个电路中，关上开关S_1，打开S_2和S_3，这样超导线圈L_3就充电了。在L_3通上电流后，关上S_2，打开S_1，使电源部分和线圈之间切断，等于撤离了电源，S_2是超导开关，合上后在电路2中就有了一个持续电流。于是电能就被储存在由线圈L_3组成的电路2中了。若要释放储存的电能来使用，只要关上S_3，打开S_2，储存

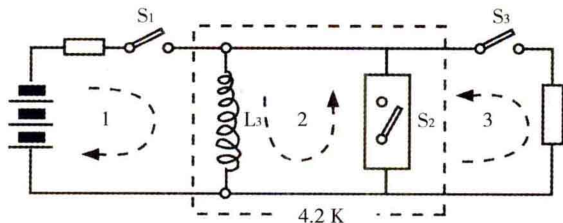


图15.2 超导储能装置工作原理图



的电能就消耗在外部电路3中的负载上了。

当然，超导线圈储能还无法把天空中闪电的电能储存起来。那么这种超导线圈储能究竟在哪个方面可以派上用场呢？

这个问题，还是请去年参加电力夏令营的南开中学小明同学来回答吧。

去年夏天，小明随重庆市电力夏令营小分队先参观了三峡大坝，后来又参观了广东省惠州抽水蓄能电站和四川攀枝花的二滩电站。

在参观广东省惠州抽水蓄能电站时，小明很奇怪，就问领队的电力局李工程师：修水电站就是为了蓄水发电，所有的电站应该都是蓄能电站，为什么唯独惠州的这个水电站叫做蓄能电站呢？

李工程师一面表扬小明肯动脑筋，一面解释：那叫“水库抽水蓄能”。在夜间，电网上用电量减小了，水电站发出的电还

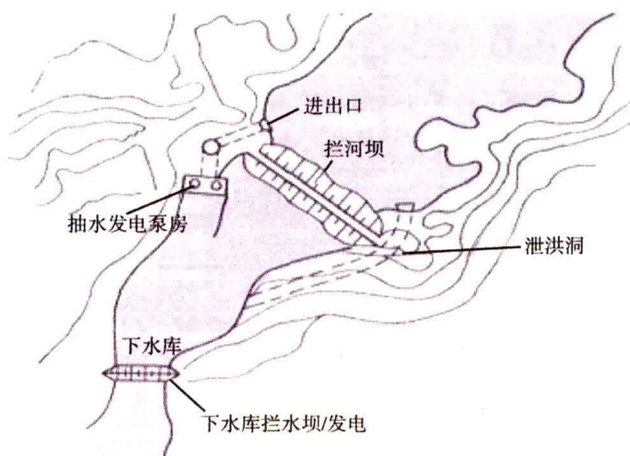


图15.3 抽水蓄能示意图

是那么多，多余的电力怎么办？就开动抽水机来抽水，把下面水库的水抽到上面那个水库里。用物理课上说的话，这叫把多余的电能转变为水的势能储存起来。到第二天白天，电网上用电量高的时候，发电站总发电量不够用时，就增加上水库的发电机组发电，满足需要（图15.3）。我们参观的就是惠州蓄能电站的上水库。

“国内只有这一处修了蓄能电站吗？”

“国内还有很多蓄能电站，山东的泰山、安徽琅琊山、浙江安吉天篁坪等都建有蓄能电站。重庆市早在2004年就打算在三峡水库周边的云阳玉龙、开县兴隆、巫山龙雾坝3地修建三峡水库抽水蓄能电站，以缓解夏季用电高峰之急。2009年1月4日，

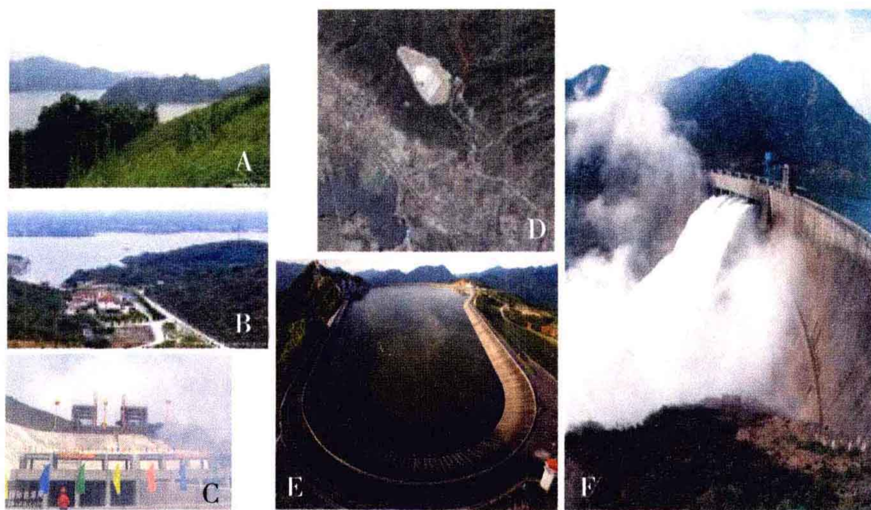


图15.4　国内几个蓄能电站和二滩电站
A—广州蓄能电站的上水库；B—琅琊山抽水蓄能电站下水库；
C—惠州抽水蓄能电站上水库；D—泰山抽水蓄能电站；
E—浙江安吉天篁坪蓄能电站上水库；F—二滩电站



彭水县蔡家槽抽水蓄能电站项目已经公开在网上招标了。

小明听了，似懂非懂。接下来参观二滩水电站时，小明又糊涂了：既然修上水库可以储存电能，为什么这二滩水电站不修上水库呢？

小明没有马上找李工程师，而是仔细地观察地形地貌，好像明白了什么，这时电力夏令营的指导员、南开中学的物理老师赵老师走了过来，小明就迎了上去，问："赵老师，二滩电站没有修上水库，是不是因为这里的地形不适宜修上水库？"

"对。"赵老师说。

"那把水从大坝外面抽到里面来，是不是也可以储能呢？"

"当然也可以。这个电站没有这样做，可能是装机容量有限，没有空闲的机组；有的电站大坝内外的水面落差不大，抽水蓄能效率低。"

"这样一来，到深夜，多余的电能怎么办？"

"没有别的办法，只有停机不发电。有时只好浪费一些电能。是的，这样到用电高峰时电就不够用了。"

"要是有一个很大很大的蓄电池那就好了。"小明自言自语地说。

"是啊！"李工程师接上来说，"我们市电力局有一个科研项目，就是为水电站研制超导线圈储能装置。如果能够研究成功，一个小小的超导线圈就可以抵得上一个很大的上水库。比如，给一个发电容量为300万千瓦的电站研制一个超导储能装置，直径只有200米，就可以把这个电站一天的发电量储存在里面，效率可达95%以上。"

“是吗？！”小明很惊讶。

“这在电力行业，我们叫做：电力系统尖峰负载调节。用超导储能就是将夜间的剩余电力储积在超导线圈中，到白天电力消耗激增时再使用这些电力。”

赵老师补充说：“这超导储能还有一个特殊作用：火力发电站、原子核发电站的容量越来越大，一旦发生送电事故，对发电厂的威胁很大。如果有一个储能线圈，到时候有一个自动装置，一合电闸，强大的电流就可以送进超导线圈储存起来，就好像洪水涌来，我打开闸门分洪一样，就平安无事了。”

“看起来，超导线圈真能派上用场。”

“不过，在我们这里这还没有实现。国外已经有了。最常见的是环形高温超导储能装置（图15.5）。使用环形线圈的优点是磁场完全约束在线圈内，不存在漏磁问题和屏蔽要求。环形线圈的制造有两种方式：一种为连续的螺旋圆环绕组；另一种是由数个短螺线管线圈组成的圆环组成。”

目前的高温超导储能装置主要处于实验研究阶段，所研制出来的样机储存能量比较小，大容量的高温超导储能磁体正处于理论研究与设计阶段，还没有大容量的储能样机问世。美国和



图15.5　环形高温超导储能装置。图中是德国制造的200千焦HTS储能线圈



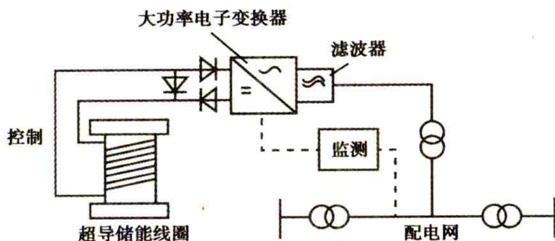


图15.6 超导储能器一次系统原理图

日本已经完成了10兆瓦小时、5千兆瓦小时和5.5千兆瓦小时等几个储能系统的概念设计，并提出了一系列需要研究解决的工程技术问题。

目前，超导储能大多数用在调节和平息电力系统低频振荡问题上。因为超导储能器可向电网提供较大的瞬时功率，这对稳定电网系统的电压、增加系统阻尼、提高系统的动态和静态稳定性也大有好处。

如图15.6所示，在正常工作情况下，系统的电流经大功率电子变换器转换成直流注入超导线圈，以电磁能形式储存起来，当电网出现波动时检测控制系统立即发出释放能量的信号，此时储存的能量在极短的时间内经变换器转化成交流电输出，以满足系统的要求。

美国西部电力系统为了解决交流、直流输电联网后引起的低频振荡问题，就在系统中安装了一个3 000万焦耳的超导储能装置，超导线圈直径4米，高1米，在电力系统中进行了现场实验，对平息电网振荡取得了满意的结果。

目前，美国Wisconsin电力公司已在有特殊电压稳定要求的配电网中投运了6个针对用户的小型超导储能器，美国超导公司



首次向奥地利一家铝厂出口的超导储能器已于2000年4月安装，以解决当地的电压波动问题。

日本也在进行类似的研究和实验（图15.7）。


图15.7　日本学者研制的10MJ-MW铋系超导材料储能磁体鸟瞰图

此外，超导储能还可以作为特种脉冲电源来使用。特种脉冲电源，就是可以在瞬间提供脉冲电流的储能装置。旋转装置储能属于这一类。如果改用超导线圈储能，效率就可以大大提高。这种电源可用于风洞电源、激光武器电源或电磁炮电源等。

2007年10月10日—12日，在日本的千叶市幕张MESSE国际会展中心，第2届世界新能源展览会上展示了日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的2种利用超导特征的蓄电装置。

一种是“超导储能装置（SMES）”（图15.8）。


(a)

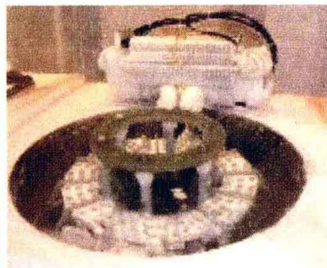

(b)

图15.8　超导储能装置（SMES）
（a）SMES 装置外观；（b）SMES装置使用的线圈



该装置可作为电池的替代品，当电流经过超导状态的线圈时，由于电阻为零，因此它能够产生持续的永久性电流。该装置直径为30厘米，将12个外径118毫米、内径100毫米的超导线圈排列成“炸面圈型”形状（图15.8(a)）。尽管采用超小型设计，但超导材料制成的线圈线材的总长度达到185米。展会上展出人员将该装置实际浸入液态氮，交替进行蓄电及输电演示。

另一种装置是超导飞轮。它是将电能转化为旋转飞轮的动能来“蓄电”。

飞轮旋转装置蓄能，是指制造一个质量很大的飞轮，即所谓“旋转装置”，利用剩余电力来转动这个飞轮，由于飞轮质量很大，因此在惯性的作用下，它会一直在旋转，也就把电能变成飞轮的旋转动能储存起来。到需要电时，再用这个飞轮来转动发电机发电。

图15.9所示的就是类似的小型飞轮，在欧洲的列车上已进入实用阶段。不过这种装置只能提供短暂时间的电能储存，尤其是飞轮的转动轴和轴承之间的摩擦导致的能量损失无法避免。

日本这次展出的飞轮装置，不同的是它利用超导，使旋转的飞轮悬浮在空中，这样由于摩擦导致的能量损失就几乎没有了。这个飞轮的直径3米多，重25吨。研制人员说：“一周内损失的电能仅约2％”，且这2％中包含维持超导状态的冷却装置所需要的电力。该装置可设置在铁路变电站，用于列车的再生电力，将减速时车辆的动能储存在飞轮内，在列车启动时再次使用。

我国现在也有这种储能装置问世。图15.10就是北京美尔斯



通科技发展有限公司设计的高温超导飞轮储能器，它的飞轮就是悬浮运转的。

那么，同学们一定会问，“超导”，不就是零电阻吗？怎么能够让飞轮悬浮在空中，上不沾天，下不着地呢？

我们说到现在，只讲了超导体的第一个性质：零电阻。超导体还有一个独特的性质：零磁感。说到零磁感，我们很为昂内斯叫屈。本来是他第一个发现了零电阻，发现了超导体，就应该是他发现零磁感才对。可是，20多年过去了，让德国的物理学家迈斯纳和奥克森费尔特发现了。有人说，那是因为昂内斯做实验的时候，用的金属球是个空心球，而不是用的实心球。这是真的吗？

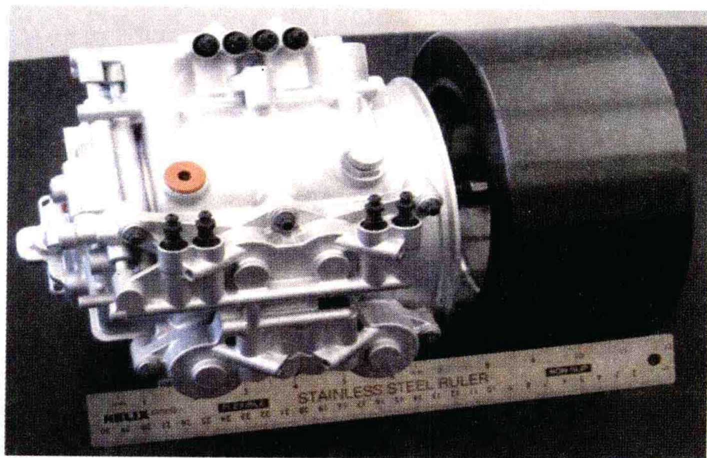


图15.9 小型常规磁体飞轮储能装置实物全长只有30厘米，总重仅为24千克



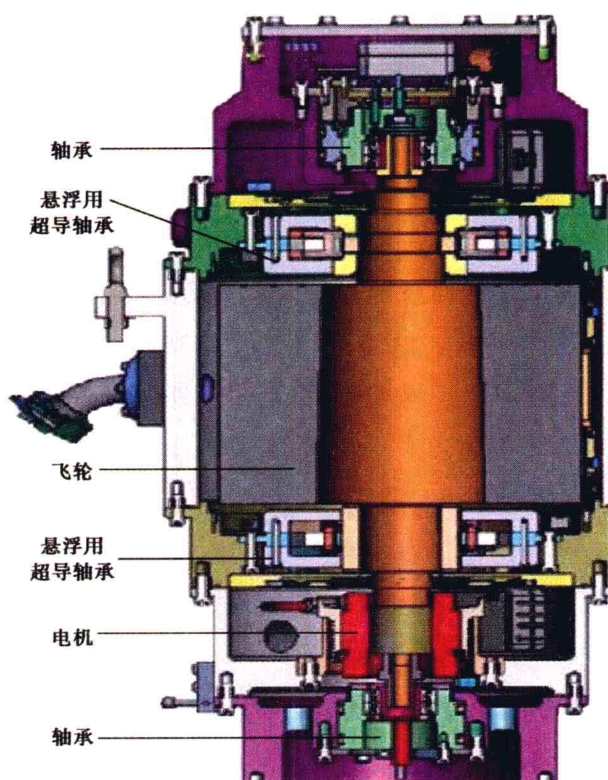


图15.10 北京美尔斯通科技发展有限公司设计的高温超导飞轮储能器剖面图



16 空心球和实心球的失误

在零电阻的研究上，昂内斯是无与伦比的。

他在创立了“超导电性”一词、提出新的电阻理论后，时时在思考着一个问题：

零电阻？究竟是真的为零值，还是电阻小得测不出来呢？

所以，在1914年4月至5月，昂内斯设计了一个极为巧妙的试验来解决这个问题。他用一根铅导线制成一个闭合的线圈，做了一个“铅丝环”。先给环加上一个外磁场，比如加上一块永磁铁，然后降低温度，一直降到液氦温区，使铅丝环进入超导态，再撤去外加的永磁铁，因为在撤走外磁场时闭合线圈中就可以感应产生电流。如果线圈的电阻确实为零的话，电流就不会损耗而减小。如果线圈确实还有极小的电阻，这个电流应该随着时间的延长而逐渐衰减。

为了测量铅丝环里的电流，自然不可能像中学物理书里所说的那样，把电流表直接串联在铅丝环上。因为电流表本身就有电阻，直接串联在铅丝环上，那铅丝环线圈中就有电阻了。

为此，昂内斯采用另外的办法，通过测量铅丝环电流产生的磁场来推断电流的变化。如果测得的磁场没有变化，就表示电流没有变化。



结果，两个多月后，铅丝环里的电流没有丝毫衰减。这就是说超导电性确实是零电阻。直到40多年后，在20世纪50年代，国外还有一位低温物理学家做了同样的实验，实验的时间持续两年半之久，也没有测到铅丝环中感应电流的衰减。这位低温物理学家还把他的实验装置空运到国际会议上进行展示。

但是，这个零电阻研究上显示出非凡才能的昂内斯，这个在20世纪初一直在超导科学研究上处于领先地位的莱顿实验室，却在发现零电阻之后长达20多年的时间里，没有能够发现超导体另一大特性，超导体的磁特性：零磁感。

直到1933年，迈斯纳-奥克森费尔特效应发现后，昂内斯才惊讶地发现自己落在德国物理学家之后了。

这是怎么回事呢？有人说，那是因为昂内斯实验用的金属球是个空心金属球，而不是实心金属球，以致失去了发现零磁感的机会。

所谓“零磁感”，指的是处于超导态中的超导体不会被任何磁场感应而磁化，而自发地把外加的磁场全部排斥在超导体之外，所以自身不会被感应，其感应磁场强度等于零。

在当时，谁也不知道超导体会有这一特性。人们只可能想到既然电阻为零，电、磁相连，那么这超导体会有什么样的磁性特征呢？

昂内斯是这样认识的：他提出“理想导体”的概念，认为处于超导态的导体，也就是零电阻导体，是一种理想导体。既然超导态是零电阻，那么在超导态的物体内部就不可能存在电场，因此根据电磁感应定律，穿过理想导体的磁通量就不可能



改变。施加外磁场时，磁场不能进入理想导体；原来存在于导体内的磁通量，在临界温度以下，仍然会存在于导体内不被排出来；当撤掉外磁场后，为了保持导体内磁通量，将会产生持续感生电流，在导体内产生相应的磁场。这类特殊的磁性，应该是由零电阻导致的结果。

昂内斯为了证实自己的推测，就做了一个实验：他造了一个空心的金属球，在常温下给它外加一个磁场，很容易就被磁化了。接着，他一边保存这个外加磁场不变，一边降低温度，使这个已经被磁化了的空心金属球进入超导态，这时没有发现有什么异常的情况。接着，他们一边保持温度不变，即金属球处于超导态不变，一边撤去外加的磁场，再看金属球，仍旧还具有微弱的磁性，这种结果与普通导体的磁性特征是一样的。

1933年，迈斯纳和奥克森费尔特等为了判断超导态的磁性是否是完全由零电阻决定的，也进行了一项上面同样的实验，见图16.2，不过他们用的是实心金属球。他们和昂内斯的实验方法一样，迈斯纳用外加磁场在常温下将实心金属球磁化，接着

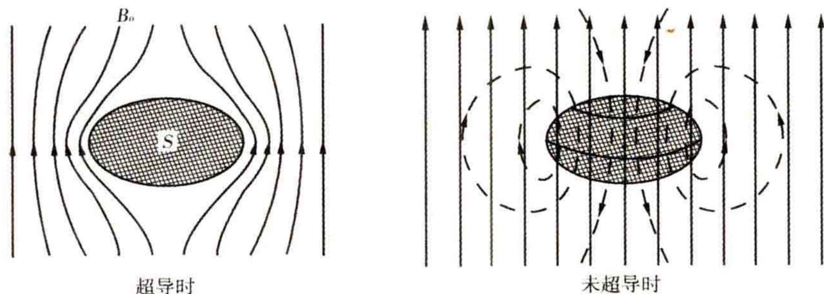


图16.1　迈斯纳-奥克森费尔特效应（完全抗磁性）实验的磁通线图
→外磁场磁通线┈→磁化引起的磁通线



一边保持磁场不变，一边降温。但是，当实心金属球进入超导电态时，结果并不像上面所说理想导体的那样，磁场保留在超导体内不变，而是相反，磁场完全消失，外加磁场的磁力线被完全排斥到实心金属球之外。可见，这种特殊的磁性质，是完全被排斥于零电阻性质之外的又一基本性质。

后来，人们将这种磁通从超导体中排出去的效应，称为迈斯纳效应。即超导体具有“完全抗磁性”。金属球一点磁性也没有的现象被称作“零磁感”。

我们可以自己做一个实验（图16.2）：用一根细棉线系着一块条形磁铁，沉甸甸的磁铁把棉线拉得直直的。然后提着棉线慢慢地将磁铁放入一个液氦池里，液氦池里有一个金属盘，此时金属盘处于超导态。当磁铁下降到快要接触盘子时，棉线变松了，变弯了，再往下放，按常规磁铁应该落在盘子上了。可事实并非如此，只见磁铁并未再往下落，好像有一只无形的手托着，棉线变得弯曲朝上了。这就是超导体排斥外加磁场的试验。

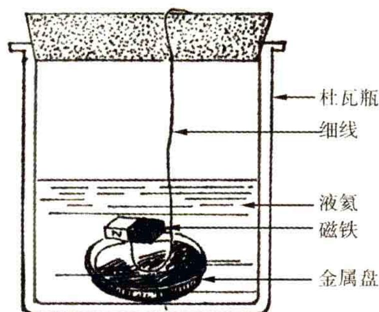
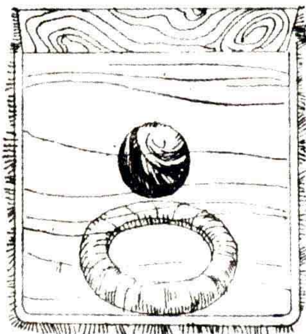


图16.2　完全抗磁性实验-1

完全抗磁性表现的另一方面也可用实验来说明（图16.4）：将一个铅环放在液氦池内，并设法使铅环带上感生电流，因为在液氦中，所以铅环处于超导状态。这时，将一个铅皮做的金属球，用夹钳夹住，从铅环的正上方慢慢地往下放。当金属球快要接触到铅环时，松开夹钳，金属球竟然不会落在铅环上，


图16.3　完全抗磁性实验-2

而是悬浮在铅环的上方，与铅环保持一小段距离。这说明，铅环中超导电流产生的磁场，和金属球中感应的超导电流产生的磁场相互排斥。

上一节中那个用来储能的“飞轮”就是利用超导体的这一特性设计的。

至此，可以说得全面一点，“超导”具有两层含义，一个是零电阻，叫超导电性；一个是零磁感，叫完全抗磁性。

莱顿实验室在发现完全抗磁性上落后于德国的原因，固然与空心球、实心球有关，但并不是根本原因，问题的关键还在于思想方法的落后。

首先，超导电性被发现后，昂内斯把超导体看成是理想导体，即其他性质和正常导体一样，仅仅是电阻等于零，认为不可能有随时间变化的磁场，提出所谓“磁性冻结”的说法，并认为这是不言自明、不需检验的。这种思想到1933年零磁感发现之前，在莱顿实验室一直占统治地位。当莱顿人中年轻的一代怀疑“磁场冻结”的说法并着手准备检验时，已经来不及了——迈斯纳效应公开发表了。

其次，莱顿人特别强调精确的定量测量，每一扇物理实验室的大门上，都写着“知识来自测量”。这句话有着极大的片面性。因为，过分强调测量，就导致了忽视观察。如果知道你要测量的是什么，那么你去测量，而且越精确越好。如果你不知



道这个现象，你就无法去测量这个现象。不进行可能导致新东西的观察，只进行已知量的测量，是不好的倾向。对于发现新效应来说，测量并不总是最好的方式。

第三，用空心球做实验并不是绝对错误的。如果真能进行精确测量的话，就会发现，残留在空心球上的微小的磁场，和理论计算预测的磁场值并不一致，而且小得多，如果因此而想到用各种球体，包括实心球来反复试验，那样就一定会发现完全抗磁性。

在说了迈斯纳–奥克森费尔特效应之后，说说莱顿人在这个问题上落后的教训，是必要的。它值得我们今天深思和借鉴。

当然，昂内斯仍旧不失为伟大的科学家，他找到了液化氦的方法，为我们开辟了一个广阔的新的研究领域，为我们打开了低温世界这魔术般的迷宫。

说到这里，我们提到了四个概念：超导热性、超流动性、超导电性和完全抗磁性。这里需要区别一下：超导热性和超流动

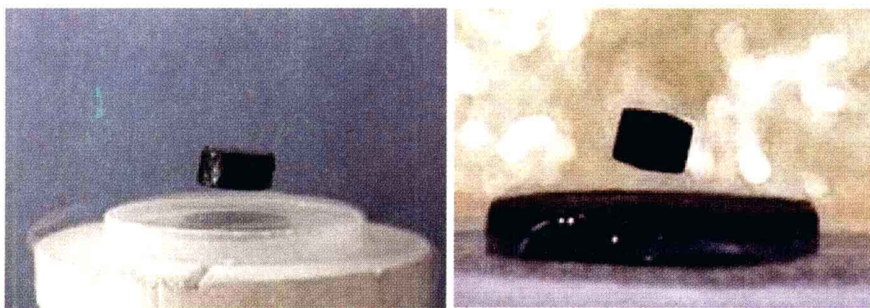


图16.4　迈斯纳–奥克森费尔特效应（完全抗磁性）实验
图中下部圆形物是超导盘，用液氮冷却，它产生的磁场使上面的小金属圆形物产感应电流，感应电流产生另一个磁场，两个磁场互相排斥使小金属圆形物悬浮



性，说的是液氦自身的性质。超导电性和完全抗磁性，指的是导体在液氦温度下具有的性质，说的是导体。

完全抗磁性的发现是一个了不起的发现。正是由于它，使得像一条长龙似的火车可以腾空飞行，有了会飞的列车！



17 会飞的列车

长龙似的列车还会飞？

不信吗？请看录像：

电视屏幕上，风景如画，绿草如茵。两条并列的高架铁路横贯镜头。可是，奇怪，两边那深蓝色的是铁轨吗？不像，也没有枕木，更没有道砟，在列车的正下方有一个长长的平板似的设施，一直通向远方。列车好像是骑在高架路基上往前行驶。

一会儿，远处一列由三节车厢组成的、极其漂亮的流线型列车飞似地沿着那高架路基开来。

“呜——”只听到一声长鸣，列车呼啸而过。

镜头推出列车下缘和路面处的特写：列车腾空悬浮在路面之上，距离路面好几厘米的高度……



图17.1　上海磁悬浮列车在行进中





图17.2 上海磁悬浮列车开出车站（右上）、站台（右下）和途中（左）

这是特技镜头吧?

不是。这是中央电视台录制的科技新闻片。影片上的列车是行驶在上海浦东龙阳路站连接浦东国际机场的磁浮列车路线上的磁悬浮列车。

其实，这个场面，你只要上了“上海磁浮网站”也就能看到。他们的网址是：http://www.smtdc.com，进去后在网站首页点击“虚拟旅程”中的“列车交会”就可以看到它的英姿。

上海的磁浮列车线是由中德两国合作开发的。2001年3月1日破土动工，2002年12月31日全线试运行，2003年1月4日正式开始商业运营。时速高达430千米，长达30多千米的路程只需要



6～7分钟。它是世界上第一条商业运营的磁悬浮列车专线（图17.1、图17.2）。

2002年12月31日，上海磁浮线正式开始试运行的第一批客人，是时任中国国务院总理的朱镕基和德国总理施罗德先生。两位总理稳稳地乘坐在世界上唯一的磁浮运营线上，透过窗外，看着远远落在后面的汽车，享受着每小时430千米速度带来的快感，他们都点头笑了。

现在，这条磁悬浮列车线路要延伸到杭州。早在2006年，这项工程获得国务院批准立项。沪杭磁悬浮线路设计全长175千米，最高时速可达450千米。2008年8月19日，浙江省政府一位官员透露，浙江省政府最近发布的重大项目建设行动计划(2008—2012)中已经把沪杭磁悬浮专线列入计划。

还有，在四川成都青城山，西南交通大学研制的“青山磁悬浮列车线”于2003年完工，交付使用。该磁悬浮试验轨道长420米，主要针对观光游客，票价低于出租轿车费。

我国开发的磁悬浮列车，有西南交通大学的高温超导磁浮列车“世纪号”和常导型磁浮列车“未来号”，还有中国成都飞机工业集团开发的“海豚号”。它们都是我国技术人员自主开发的产品。

德国是最早开始研究磁浮列车技术的国家。早在1922年德国的赫尔曼·肯珀就提出了电磁悬浮原理，并在1934年申请了磁浮列车的专利，并由此开始为人类编织一个高速乘行的梦想。1971年，世界上第一台有载人能力的磁浮列车诞生在德国，1997年4月，德国决定在柏林和汉堡之间建一条全长292千米的磁



浮线，原计划1998年下半年动工，2005年投入商业运行。后来由于新的预测表明建设新线将面临亏损的危险，遂于2000年2月取消了建设计划。

在日本，早在1962年就开始研究超导磁浮技术。1972年，日本是建成世界上第一台超导磁浮列车的国家。至1999年2月10日，随着在日本山梨县境内进行的5节车厢、时速500千米、荷重270人分编组运行试验的成功，日本超导磁悬浮列车的基本研制计划已接近尾声。本世纪以来，已经在东京、名古屋、大阪之间构想和铺设磁悬浮列车中央新干线，进行商业性运营线路的建设。

在英国，曾有一条连接伯明翰机场和英特纳雄纳尔火车站的磁浮线路，600米长的距离，旅客只需90秒就能到达目的地。虽然这条磁浮线已经不再继续运营，但是它带来的磁浮冲击波无疑是震撼的。

此外，法国、俄罗斯、韩国都在积极发展磁浮列车。在美国，1993年开始表现出对超导磁浮列车研制的极大兴趣。1998年又提出直接使用德国技术，进入商业化示范应用。2004年时，参议院、众议院在提案中都再次批准磁浮部署计划，并决定对未来第一个美国磁浮示范项目的投资。但是，直到今天进展都不大。为什么会有这么多国家在研究发展磁浮列车呢？

因为随着人类社会的发展，各大城市之间人员流动频繁，客运量越来越大，像日本东京到大阪之间每天的客运量达20多万人次，有时突破42万人次，当然希望通过提高车速、增加发车次数来解决。特别是劳动力价格越来越高，往返时间将成为商品生产



中非常关键的因素。将来，市区与机场、市中心区与卫星城的短程、中程交通，或作为交通走廊的国际大城市之间的远程交通，不仅客运量大、而且行车速度也成了关键，快捷到达，将是未来乘客的首先选择的因素。

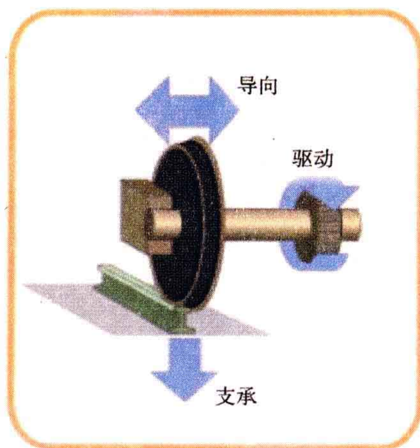


图17.3 传统列车的驱动/支撑原理

还有，传统的列车是轮轨式的（图17.3），是依赖车轮与铁轨间的摩擦力作为推动力行驶的，因此速度的提高十分有限。从理论上讲，其极限速度也不过每小时300千米。轮轨式列车由于车轮与轨道的接触，运行中给车辆造成振动，噪音太大，而且还有磨损，不仅乘坐质量差，还因为要考虑安全问题，不能过分提高列车速度，远远达不到理论上计算的速度值。

很自然地，如果整列列车悬空而起，让车辆和轨道脱离接触，速度不就可以大大提高了么，行驶中的振动、噪音不就大大减小了么。“磁悬浮”就是让列车悬空而起的一个办法。

其实，磁悬浮的原理很简单。我们知道，磁性物体有正负极，或者叫S极和N极。磁悬浮就是利用磁性的同性相斥、异性相吸的原理。

我们可以做一个实验，用两个圆柱形的小磁铁，直径相同，一样粗细，两头都清楚地标着“N”和“S”字母，表示极性，放到直径比磁铁稍大一点的玻璃管里，先是玻璃管口朝上，把



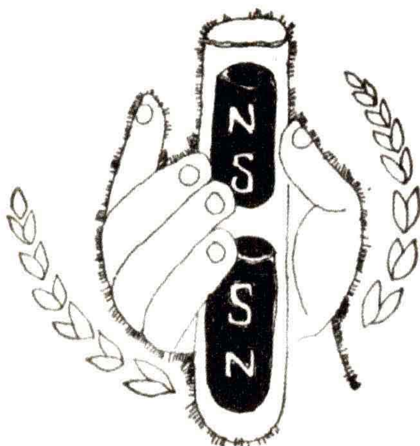


图17.4 斥力型磁悬浮

一块小磁铁轻轻放进去，S极朝上，再把另一块小磁铁按S极朝下放进玻璃管，就会发现一个奇妙的现象：上面的小磁铁落到一定的高度之后，居然是浮在玻璃管内，并不落到下面小磁铁上，像有一只手托着似的。这就是斥力型磁悬浮（图17.4）。

借助于这种同性相斥的原理来设计的列车，称为斥力型磁悬浮列车。

此外，还有吸力型磁悬浮。当我们用手拿着圆柱形小磁铁，S极朝下，然后另一只手拿着另一个圆柱形小磁体，N极朝上，并慢慢地从下向上地朝上面那个小磁铁的S极靠近，我们会发现下面的小磁铁还没有接触上面的小磁铁，就被吸了上去，松开下面的手，小磁铁也不会掉下来。

图17.5的图A是吸力型磁悬浮的作用原理图。图A正中处的浅蓝色构件①是列车的支撑架，在它的上方支撑着列车车厢。图A左边铁灰色构件是轨道架②，又称导轨。导轨向右伸出悬臂，悬臂下的绿色块状物③是磁体，再往下的红色构件④是列车上的电磁体。当两个磁体通电之后，具有磁性，同性相吸，就会把红色构件下的列车支撑架提上去，悬浮起来。通过控制电磁铁的电流强度，可以使磁铁吸引力和列车重力相互平衡，让电



磁铁和轨道间保持1厘米左右的间隙，也就是浮起1厘米。然后，在电磁力的牵引下向前行驶。

由于磁悬浮列车上产生磁力的电磁体，有常规磁体，也有超导磁体，人们把使用常规磁体的称作“常导型”，把使用超导磁体的称作“超导型”。

上海磁悬浮列车属于常导—吸力型磁悬浮列车。

和斥力型磁悬浮相比较，常导—吸力型磁悬浮列车存在一些缺点：

首先，在吸力型磁悬浮列车上，要安装庞大的悬浮用常规磁

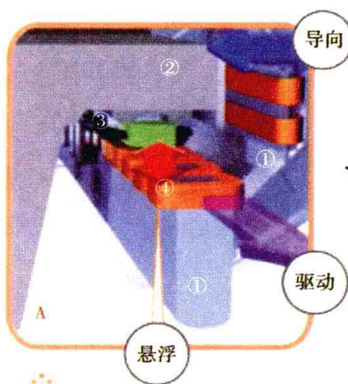






图17.5 吸力型磁悬浮驱动运行原理图
A—吸力型磁悬浮驱动、悬浮的原理；
B—上海常导-吸力型磁悬浮列车轨道；
C—成飞集团制造的、我国首列100%全数字化设计的、时速高达500千米、拥有完全自主知识产权的中国第一辆高速磁悬浮列车车厢主体



体，这增加了列车的重量，耗费大量电力，尤其是重量加大会限制车速的提高，时速最高也只能达到300千米左右。



图17.6 德国埃姆斯兰测试线路上的磁浮列车

其次，由于为了便于上下吸引，轨道和车体之间的间隙，只能空出1厘米左右，列车是高速运行的，导致在轨道的设计、制造和安装的精度上要求很高，这就会直接提高制造成本；在有冰雪覆盖或地表略有下沉的情况时，列车行驶安全性又会受影响。而冰雪覆盖或地表略有下沉几乎是不可避免的。

由于这些不足，许多国家转而研制斥力型超导磁悬浮列车。日本在山梨县境内试验运行成功的就是超导-斥力型磁悬浮列车。

超导—斥力型磁悬浮列车的原理是这样的：

在图17.7中，标有①的两条伸向远方的是“车轮支撑轨”，供列车在启动和停站时使用。图中标有②的是保证列车行驶方向用的。图中标有③的是梁，在梁内安装有两种铝环，一种是“悬浮和导引线圈”，一种是“推进线圈”，又称“地上线圈”（图17.8中的蓝色部分）。



在梁正对的上方，也就是磁悬浮列车的底部，装有用超导材料做成的线圈：浮起用超导磁体。液氦储槽中是液态氦，使线圈处于超低温条件下，保持超导状态。这时给超导线圈通上电流，线圈就会产生很强的磁场。再设法撤离电源，使超导线圈内带上持续电流，相应的所产生的磁场也就会持续不变了。

当列车启动后，向前运动，超导线圈产生的磁场也就随着列车一起往前运动。这时，就等于安装在两侧“梁”内的铝环在磁场中向后作切割磁力线的运动，从而使铝环内产生感生电流，感生电流也就同时产生磁场。因为超导体在超导态时具有完全抗磁性，所以铝环内感生电流的磁场就受到车上超导线圈的完全抗磁性的排斥，也就产生了一种托升车体的浮力。

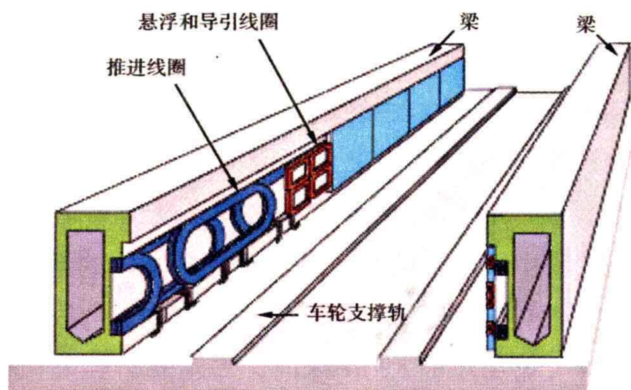
不过，铝环不是超导体，铝环内的感生电流会很快衰减的。但是，当车速大于每小时120千米时，车上超导线圈掠过每一个铝环的时间极短，使第一个铝环内的感生电流还来不及有明显



图17.7　日本山梨县磁悬浮试验线路上的导轨



衰减，列车就已经进入第二个环了，从而使列车始终保持受到一个向上的浮力。显然，速度越快，衰减越小，浮力越大，当浮力大于列车的重量时，列车就悬浮而起了。悬浮高度根据设计而定，有4厘米、10厘米，甚至可以高达15厘米。



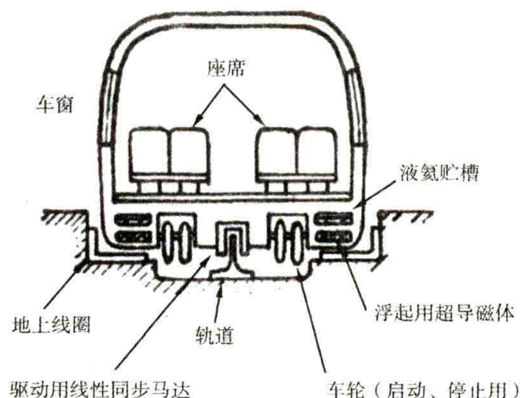


图17.8 斥力型超导磁悬浮列车运行原理图



由于悬浮高度（科学家们称作空气隙）的加大，就避免了吸力型磁悬浮列车空气隙过小产生的弊病。由于间隙较大，允许变化的范围就大，因此轨道刚度、精度都可以降低，因而成本可以大大降低。据计算，在平道上可降低20%，在坡道上可降低40%。同时，由于间隙较大，在冰雪覆盖路面或地面细微下沉时安全性也不受影响。

列车悬浮后，行进中只受到空气的阻力，时速最高可达550千米。

速度较低时，如启动、靠站，悬浮力会因铝环内感生电流衰减而变小，托不起列车，这时就放下列车底部两侧的辅助车轮行驶。列车底部中间的辅助车轮是作定位用的。在列车浮起时，辅助车轮会自动收起缩入车内，就如同飞机上的起落架。

同学们可能会奇怪，列车悬浮后，失去了车轮与路轨的摩擦力就失去了列车前进的动力；又没有螺旋桨或喷气发动机，它是靠什么来获得前进的动力并且跑得那么快呢？

告诉你，还是离不开超导，它靠的是超导马达！

不过，磁悬浮列车运行用的超导马达和我们在第12节所说的不一样，它是一种“线性超导同步马达”。

这是一种奇特的马达，要问它有多大多长，它和磁悬浮列车线路一样长。

它的“定子”和“转子”不是组合在一起的，而是分开的，而且“定子”多得不计其数，一个接着一个，这种铁路通到哪里“定子”就沿着路轨铺到那里。所以又称作“长定子同步马达”。就是图17.8上图的蓝色的“推进线圈”。“转子”则只

有可数的若干个，是由超导材料做成的，安置在列车车厢的底部，用液态氦保护着，使它保持超导电性。就是图17.8下图的“浮起用超导磁体”。其实，称它“转子”并不恰当，因为它并不转动，只能称“动子”。

通过车站上的电子计算机精确地控制送入“定子”的电流，使列车在前进的每一瞬间，车体前面路轨上的定子线圈产生的磁场，总是与车上超导线圈产生的磁场极性相反，这种极性相反磁场间的吸引力就拉着列车前行了。定子线圈是常规磁性线圈，产生的吸引力不大，但是一个线圈刚过，下一个线圈又到了，这样列车在行进中始终受到一个牵引力的作用，也就会产生加速度了。

据计算和实际使用来看，采用超导磁体的长定子马达，其输出功率会大大地提高，与使用常规磁体相比较可提高几十倍，甚至一二百倍，同时却可以大大缩小磁体的体积，甚至只有常规磁体的十分之一。真是缩小了体积，减轻了重量，提高了速度。



18 超高速电子计算机



图18.1 布朗·约瑟夫森（1940— ）

谁都知道，电子计算机是一种能够进行高速运算的工具。现在，这个标题在“电子计算机”的前面还加上“超高速”一词，就是说它是一种比高速还要高速的计算工具了。2008年8月，我国自主研发的“曙光5000”电子计算机，运算速度达到每秒百万亿次，已经是令人瞠目结舌，而这种“超高速”计算机的运算速度比它还要快！这就是运用“超导隧道结”做开关元件制成的电子计算机。

什么是超导隧道结呢？

这要从1962年讲起。那一年，22岁的英国科学家约瑟夫森发现了超导体的一个特殊效应，后来人们就称作为约瑟夫森效应。

约瑟夫森（图18.1），1940年1月4日生于英国威尔士的加的夫。1961年起，他成为超导物理学家皮帕德（A.B.Pippard）的研究生，在皮帕德的指导下做实验和理论研究。1962年，22岁的他，在欧洲的《物理通讯》上发表了划时代的论文《在超导隧道中可能的新效应》，从理论上预言了以后以他的名字命名约瑟夫



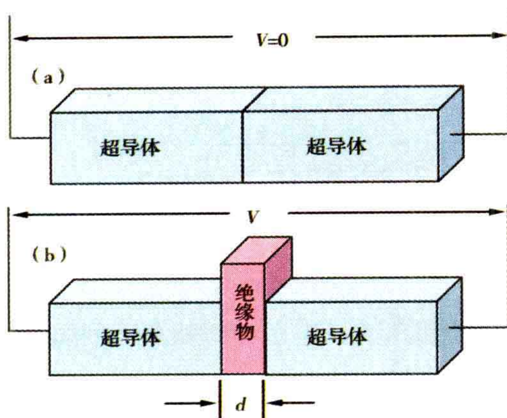


图18.2 约瑟夫森效应原理图

森超导隧道效应。第二年多人的实验证实了约瑟夫森的预言。

约瑟夫森超导隧道效应的内容如图18.2所示，蓝色的是一块超导体，将它放在低温条件下，使它具有超导性能。当我们调节通过超导体的电流时，当电流小于超导的临界电流时，不论电流如何变动，该超导体两端的电压V始终为零（图18.2（a））。因为是处于超导态，若把该超导体拦腰截成两块，并使之拉开距离或隔上一块绝缘物（图（b）中的红色部分），这时电路是断路，电路上就没有电流流过了，电压表上的读数为电源断路时的电压值（图18.2（b））。

如果缩短分成两半的超导体之间的距离d，换句话讲，就是减薄绝缘物的厚度，当距离（绝缘物的厚度）缩短到10埃（10^{-9}米）左右时，超导体两端的电压V又为零了，表明电路中又有了电流，超导体又恢复了超导状态。

既然是隔着绝缘物，电子是怎么过去的呢？超导体的电子会穿过绝缘物质。看来绝缘物上有问题，一定是有“洞”电子才好钻过去。“洞”，就是“隧道”，所以称作隧道效应。是约瑟夫森预言的，所以称作约瑟夫森超导隧道效应。

这种中间夹有非超导物质的、超导体和绝缘物质的结合体就



叫“超导隧道结”，简称“超导结”。

实验证明，当通过超导结的电流小于临界电流时，超导结的电压为零，这时超导结和整块超导体所呈现的情况十分相同，超导电流通过夹在中间的绝缘层，此时绝缘层好像也成了超导体，这时的电阻为零。如果通过超导结构的电流大于临界电流，一切如常，绝缘层就有了电阻，超导结两端的电压就是一个有限值，通过超导结的就不再是超导电流。

这样，超导结就有了结电阻为零和不为零两种状态，而且转换速度相当快。这种性质就正好可以用来作计算机元件了。

计算机是使用二进制的，只用到0和1两个代码。

因此，任何一种物理现象，只要能显现两种稳定状态并且可以在两者之间转换，就可以作为计算机的“开关”元件或存储元件，而这两个稳定状态就分别代表0和1。那么，超导结的结电阻为零和不为零，或结两端的电压为零和不为零，是两种稳定状态，可以表示为0和1，而且0和1之间的转换，可以一次接着一次，一秒钟内可以“开关”一百多亿次。

计算机曾用穿孔纸带（图18.3）作输入输出工具。同学们可能没有见过穿孔纸带。它是在一种特制的纸带上打孔，以有孔和无孔两种稳定状态来代表0和1，两者之间的转换速度低于纸带的行进速度。

计算机还用过半导体管开关元件作输入输出工具，它以接通和断开两种状态表示0和1，两者之间的转换速度仅为4毫微秒。现在计算机上用的软盘以被磁化的左方向和右方向两种状态表示1和0，其转换速度为几百毫微秒。

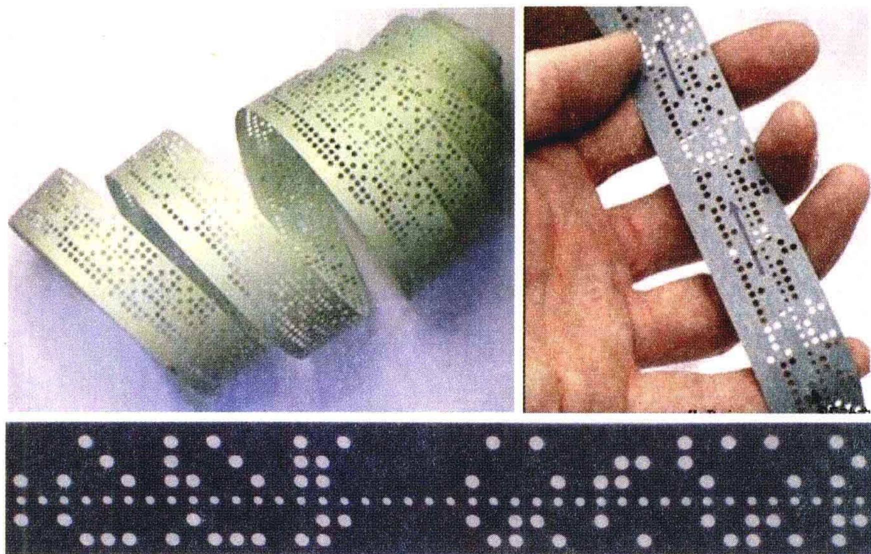


图18.3 电子计算机使用的穿孔纸带

“超导隧道结”以结端电压为零和不为零来表示1和0，其转换速度可以达到400微微秒，独占鳌头，从而可以大大提高电子计算机的运算速度。

超导数字电路元件（图18.4）是利用约瑟夫森结（超导结）制作的计算机开关元件，和使用半导体开关元件相比，开关速

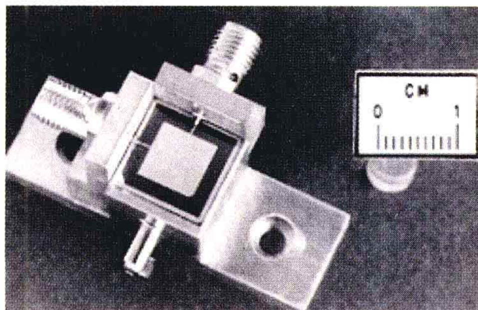


图18.4 超导数字电路元件



度可达一百亿分之一秒（10^{-10}秒）左右的数量级，运算速度快100倍，功耗只有千分之一左右，而且体积和重量都会大大减小，为制造亚纳秒电子计算机提供了一个途径。

这里涉及好几个关于秒的时间单位，作一下说明：毫秒，是一秒的千分之一。微秒，是一秒的百万分之一。纳秒，是一秒的亿分之一。毫微秒，是一微秒的千分之一。亚纳秒，就是比纳秒慢一点。

2008年6月9日，美国IBM公司与能源部展示了他们耗时6年开发的超级计算机（图18.5），运算速度达每秒1 000万亿次，是迄今第一台全球运算速度最快的超级计算机，相当于把10万台目前配置最好的笔记本电脑的运算能力累加到一起，被评为世界十大科技新闻。可是它占地557平方米，重226.8吨。要是能用超导结做元件恐怕结果就不是这样。

在2008年全球高性能计算机的排行榜上，我国曙光5000A计算机再次跻身于世界超级计算机的前10名，成了除美国本土之外速度最快的计算机。但是我们同样看到了巨大的体积和重量（图18.6）。

所以，制造容量大、速度快、体积小、重量轻的超导计算机是世界各国梦寐以求的目标。媒体曾经报道，美国的电话电报公司和桑迪亚国家实验室研制出高温超导数据移位寄存器。这种超导移位寄存器在液氦温度下工作，采用了最新研制的钇钡铅氧化物超导体材料和电子束平版印刷技术，由64个约瑟夫森超导结组成。该移位寄存器工作频率为1 200亿赫兹，这一数值是目前高速个人计算机中移位寄存器工作频率的2 000多倍。它



将应用于数字通信电路和电子设备之中，并将促进超导集成电路芯片的发展。

由于高速运行的计算机，要求集成电路芯片上的元件和连接线密集排列，但密集排列的电路在工作时会发生大量的热，而散热是超大规模集成电路面临的难题。在制作超大规模集成电路时，将其元件间的互连线用接近零电阻和超微发热的超导材料和器件来制作，就不存在散热问题了。用这种超大规模集成电路块制作的计算机也叫超导计算机。

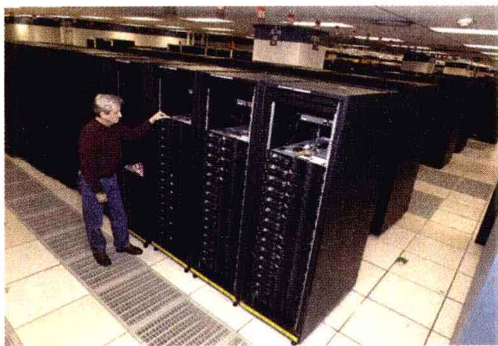


图18.5　2008年世界上运算速度最快的美国超级计算机



图18.6　2008年中国曙光5000A计算机位列世界前10名



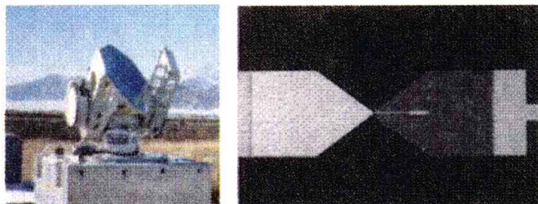


图18.7 POST亚毫米波望远镜（左）、NbN超导隧道结混频芯片局部照片

当然，直接用超导结来制作晶体管，用这样的晶体管来制作计算机，自然更是地道的超导计算机。不过，制造电子计算机上要用的超导结，工艺上的问题在于怎样生产大批量的性能相同的元件，这些元件还应当经得起温度循环并且能在室温下长期保存，因此困难还是不小的，加上超导结对低温条件要求严格，因而进展较慢。这些问题有待我们新一代的科学工作者们来解决。

南京紫金山天文台于2007年12月31日，利用他们与日本科学家共同研制的氮化铌（NbN）超导隧道结混频器通过青海德令哈的POST亚毫米波望远镜，成功观测到频率为0.46 THz的CO（J=4—3）星际分子谱线，这是国际上首次实现基于NbN超导隧道结相干检测技术的天文观测，被认为是超导混频技术研究的一个重要里程碑。



19 约氏元件大显神通

约氏元件，就是“约瑟夫森超导隧道结元件”。它是一个神通广大的元件，何止只是可以做计算机开关元件这一桩呢！

以约瑟夫森效应为基础，以建立极为灵敏的电子测量装置为目标形成的“超导结电子学”，作为“低温电子学”的主体与超导磁体相并列。习惯上人们称超导磁体技术为超导强磁技术，因为那个领域里都是为了建立超导强磁场；而超导结电子技术称作超导弱磁技术。后者在超导技术中形成了又一个大的分支领域。

这个领域的形成，主要是因为超导结对磁场、电磁辐射有极高的灵敏度，可以比常规器件高出1 000倍以上，可以精确反映出小数点后的第7、第8位的微小变化。因此在科学实验、科学计量、军事侦察、地质勘查、生物医学研究等方面的应用得到高度重视，特别是有些应用领域是常规技术无法代替的。

在测量方面，可以制成高灵敏度的磁强计，灵敏度达10^{-11}高斯，即0.000 000 000 01高斯，可测量人体心脏跳动和人脑内部的磁场变化，作出“心磁图”和“脑磁图”。在物理研究和地质探矿等方面也得到应用。

在计量方面，可以制出电压基准监视系统，高精度检流计、



电压比较仪、电流比较仪和用于射频电压、电流、功率及衰减的精密测量，用作毫米波、亚毫米波的检波器和混频器，其优点是噪声低、频带宽、损耗小。

下面就说几个约氏元件的应用。

电压基准

在科学计量方面，用约氏元件制作的电压基准已经取代了标准电池基准而成为国际计量标准。

电压的计量是非常重要的，发电厂的电压测量、供电用电器材额定电压的确定、蓄电池和各类电池的电压确定、精密电子仪表的表头刻度要保证的足够的精度，等等，都是同电压单位的标准相比较而获得的，而各国各地的电压标准又是跟电压基准相核对才确定的。

电压计量工作中的电压基准，原来是用标准电池的。而标准电池是1892年发明的威斯顿电池，就是硫酸镉电池。这种电池的电动势受温度变化的影响较大较明显，对震动很是敏感，还易老化、易漂移，而且这种电压的老化和漂移在每个电池中都各不相同。所谓“漂移”是指随时间的变化电压的标准值发生的缓慢微小的变化。所以，各个计量部门往往要备上几组标准电池，用这几组标准电池的平均电动势作为电压基

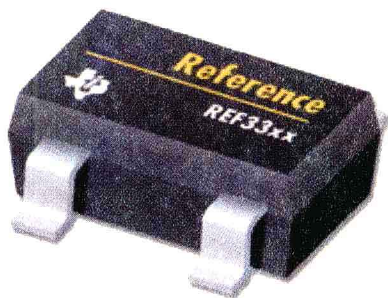


图19.1　一种市售的电压基准



准。可是，就连平均值也不可避免地有缓慢的漂移。

标准电池自身的缺陷，使得每一级计量部门的电压基准都要定期送往上一级计量部门去检定，整个国家的最终电压基准是国家计量局的标准电池组。国际上还有统一的电压基准，所以国家计量局的标准电池组每隔三年就要拿到设在巴黎的国际权度局去核定。

这样一来，又引出了标准电池组的运输问题。虽然可以采取恒温、防震等各种保护措施，在运输过程中还是难免给标准电池带来误差，典型的误差值是0.000 000 1（又写成10^{-7}）。这就是说，运输过程中造成这么大的误差是正常的。

可见，电压计量基准的准确度低于测量技术的精密度。这就是作为电压基准的标准电池自身的缺陷造成的。

用约氏元件做成的电压基准就可以克服这些毛病了。

它不仅不受温度变化、震动、老化等因素的影响，不会因为运输过程而产生10^{-7}的误差，而且其计量的准确度可以达到10^{-14}的水平。至于约氏元件制作的电压基准为什么会测出这么微小的电压值，其道理比较艰深，这里就不作介绍了。

1992年，我国已成功地制备了这样的电压基准。

磁强计

超导结中电流的强弱和外加磁场有着对应的关系，就是说测得电流的大小，就能知道磁场的大小。根据这个原理，再结合量子干涉原理，就可制成超导量子干涉器件。在科学文献中，通常把“超导量子干涉器件”的几个英文单词的第一个字母凑



在一起，拼成SQUID，有人把它译成“司逵得”。这样翻译，倒有它汉语的字面意义，司者，管理、承担也，岂不是说它可以“承担一切让它做的事”，因为超导量子干涉器件确实在许许多多方面得到应用，而且它的应用往往把灵敏度提高到一个新水平。

SQUID可以直接作“磁强计”，可以测量十分微小的磁场强度，其测量的灵敏度可达10^{-11}数量级，可以用来研究超导体的磁学性质。

根据金属的核磁化率与绝对温度成正比，而且温度低到10^{-5}K还是如此，因此用SQUID磁强计测量金属的磁化率就可以得知其温度，这就成了极好的“低温温度计”。

SQUID磁强计还可以用于地球物理科学的研究，测量沉积岩、火成岩的微弱的磁性，对于研究地球的磁性历史，甚至可以放在野外使用，无人照看自动工作几个星期。只要补充液氦，工作时间就可延长。还可以用SQUID磁强计制成“超导重力仪”。

SQUID磁强计已经应用于医学领域，什么心磁图、脑磁图，统统都已经成为新的临床诊断和医学研究的手段了。

也许同学们很奇怪，不是已经有了心电图、脑电图，还要测心磁图、脑磁图干什么呢；即使需要脑磁图，为什么一定要用超导磁体呢?

首先，同心电图、脑电图相比较，心磁图、脑磁图在医学应用上有三大特点。一是心电图只能测量交变的电流信号，不能测量直流(恒定)的电流信号，因而不能应用于只产生直流异常电



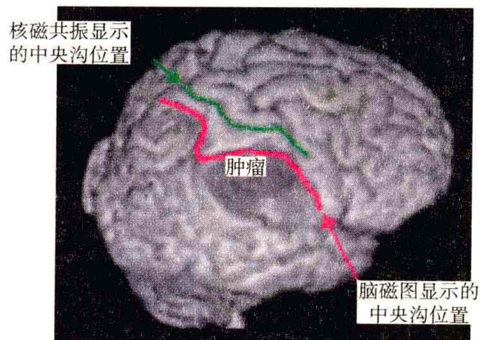


图19.2　脑磁图
这是由美国犹他大学制得的脑磁图，与用核磁共振法获得的脑磁图进行比较可以确定中央沟的准确实际位置

信号的生理病理探测，而心磁图、脑磁图却能同时测量交变和直流(恒定)的磁场信号。二是心电图、脑电图的测量都需要使用同人体接触的电极片，而电极片的干湿程度及同人体接触的松紧程度都会影响测量的结果，同时因使用电极片，不能离开人体，故只能是二维空间的测量，而心磁图、脑磁图是使用磁探头，一种测量线圈，是不需要同人体接触的，所以没有接触的影响，还可以离开人体进行三维空间的测量，可以比二维空间测量获得更多的信息。三是实验研究结果表明，心磁图、脑磁图比心电图、脑电图具有更高的分辨率。

你看，图19.2显示的是一个真实的病例。它是美国盐湖城犹他大学有关部门为一位40岁男性脑瘤患者制作的脑磁图，清晰地显示：由于脑部肿瘤的挤压，导致大脑中央沟严重变形的情形（红线条），而用核磁共振检查，肿块与中央沟的关系显示不明显（绿线条）。所以，脑磁图确定了中央沟的准确、实际位置，对手术的成功起到了关键的作用。

现在已经不只是心磁图、脑磁图，还有人体的眼磁图、肌



(肉)磁图、肺磁图和腹磁图等，取得了人体多方面的磁信息。

其次，因为人的心脏和大脑所产生的磁场都非常微弱，一般的常规磁体的磁强计根本测不出来；加上微弱的心脏磁场只有地球磁场的大约百万分之一（10^{-6}），更微弱的脑部磁场只有地球磁场的大约亿分之一（10^{-8}），因此在测量心脏磁场和脑部磁场时，必须排除地球磁场的干扰，这就需要在能把地球磁场显著减小的磁屏蔽室中进行测量。

如果使用超导量子干涉仪（SQUID）式磁强计，或者利用超导量子干涉仪式磁场梯度计等高度灵敏的设备，不仅可以测出这些微弱的磁场，而且可以在没有磁屏蔽室时进行心磁场、脑磁场的测量。这是因为磁场梯度计只测量不均匀的磁场，对均匀的磁场无反应。而在小的区域中的地球磁场是均匀的，人的心磁场、脑磁场却是随距离心、脑远近的不同而不同的非均匀磁场，所以用超导量子干涉仪式磁场梯度计时没有磁屏蔽室也可以测量人的心磁场、脑磁场。

早在1992年，我国就在心磁图方面取得成果。据新华社1992年的报道，我国赴德国留学的博士张懿在于利希研究中心海顿教授指导下，采用高温超导材料研制出高灵敏度的SQUID磁强计，在国际上第一次在液氮温区（77 K）的磁屏蔽室内测得了心磁图，测得了眨眼睛及声音感应的脑磁图。若采用两台SQUID制成梯度磁强计，就可以不用磁屏蔽室也能测得心磁图。这台SQUID磁强计已经具备医疗实用价值。现在，张懿先生担任德国Juelich研究中心超导量子干涉器工作小组组长，成为世界“超导电子学”的学科带头人之一。







图19.3　在台大医院使用的高温超导心磁图检测装置





图19.4　高温超导脑磁图检测装置

图19.3和图19.4是实际使用的高温超导心磁图和脑磁图检测装置。

除了以上两个方面之外，在水下或地下深处的工作人员要和地面通话，由于水和地层的导电性，使用普通的无线电通讯频带就无法进行通话。如果改用甚低频电磁场，那么SQUID磁强计就可以作为无线电接收机来实现通话，还可大大延长通话距离和增强通讯的可靠性。

SQUID磁强计还可以改装成“检流计”；检流计又可以改装



成“伏特计”，即电压表；而这种伏特计又可用作液氦温区的温度计。

在磁强计领域，值得一提的是中国地质调查局研制的“单分量高温超导磁强计”。在此基础上，该局又研制出了“三分量高温超导磁强计”（图19.5），通过大量的野外剖面测量试验表明，该磁强计工作稳定，测量数据可靠，获得了瞬变电磁法三分量磁场剖面曲线图（图19.6）。该成果可提高勘探深度达50％以上，使瞬变电磁法的勘探深度达1 200米，有利于推动瞬变电磁法的应用与发展，从而为危机矿山的探边摸底、寻找深部隐伏大矿、矿体的准确定位等提供了一种高新技术手段，取得了具有完全自主知识产权的创新性科研成果，达到国际先进水平。



图19.5　我国自行设计的三分量高温超导磁强计



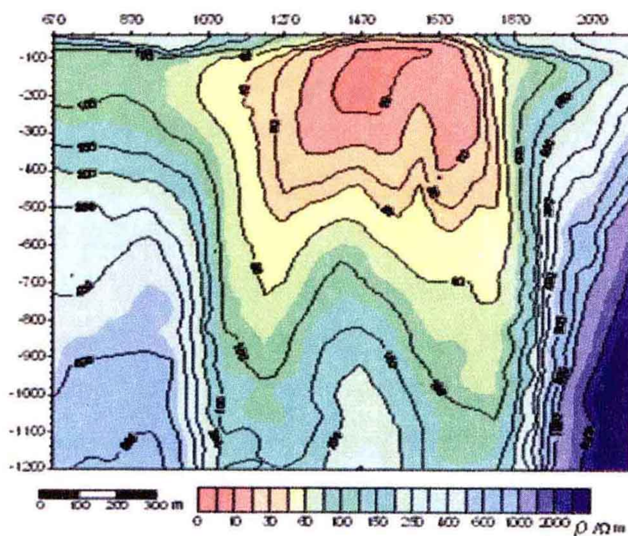


图19.6 某铜矿使用三分量高温超导磁强计做传感器获得的TEM电阻率断面图

除了SQUID之外，还有高频超导隧道元件，即高频约氏元件，可用于短毫米、亚毫米和远红外波段，并且具有噪声低、功耗小、响应快、频带宽的特点，已被应用到射电天文学领域，还将应用于遥感技术中。



20 超导的用途说不完

超导的用途，还有……

超导限流器

超导限流器是利用超导体的“超导态—正常态”的转变特性来有效限制电力系统的故障短路电流，快速和有效地达到限流作用的一种电力设备。它的工作原理是：在正常的输电系统中一旦发生故障，会出现短路电流，破坏性极大。如果电路中安装有超导限流器，短路电流发生后，就会造成超导体失超，从超导态转变为正常态，正常态就有了电阻，限流器就呈现出很大阻抗来限制电力系统的故障电流，从而达到控制短路电流危害的目的。

超导限流器集检测、触发和限流于一体，反应速度快，限流时间可以小于百微秒级，正常运行时的损耗很低，能自动复位，克服了常规熔断器只能使用一次的缺点。超导限流器主要用于电力传输和配送系统，特别是在人口密度高、经济发展速度快、对电能需求较高的地区。

2005年8月，我国第一台接入实际电网的10.5千伏/1.5千安三相高温超导限流器安装在湖南娄底市高溪变电站，投入电



网，进行载荷并网长期示范运行（图20.1）。



图20.1 安装在湖南娄底变电站的高温超导限流器

超导磁分离技术

这是根据各种物质颗粒的磁性不同，在通过高梯度磁场时，受到不同梯度磁场的作用，具有不同磁性的颗粒被不同梯度的磁场分别吸引、偏离，而一一分离开来。例如，磁力选矿机就是通过不同梯度的磁场的磁力，把不同含量的铁矿石一一分离开来。但是，如果磁力选矿机的磁场强度不高，就会把含铁量稍低但仍有冶炼价值的矿石分离不出来，而和石块一道废弃，这实在可惜。

在磁分离装置中采用超导磁体，则是解决这个问题的好方法。超导磁体的高场强、高梯度分布，就能够有效地分离磁性弱的微细颗粒物质，大大扩大分离对象和使用范围。由于场强高，所以工作口径可以扩大到数米之多，从而可以大幅度提高分选的数量，提高生产效率。同时超导磁体还具有节省能耗、



体积小的优点。实验表明，超导磁分离装置对弱磁性的赤铁矿、稀有金属、钨矿、铝矿和钽铌矿的分离、富集和尾矿的回收，都具有优异的分选能力。

其实，磁力选矿不只是铁矿石、铁矿砂的分选。所有具有磁性物质的矿物，都可以用磁力选矿机来分选。这些磁力选矿机都可以使用超导磁体。

中国科学院电工研究所与抚顺隆基磁电设备有限公司合作研制的超导高梯度磁分离机（图20.2），主要用于高岭土等陶瓷原料的提纯。由于超导磁体极强的磁力密度，对于那些微米级、弱磁性的微细颗粒，都可以有效地分选出来，用于把陶瓷原料中的铁、钛等金属氧化物的杂质去除，提高原料的纯度。

这类选矿机还可以用于煤脱硫、金属矿富集、污水处理等工业领域和环境保护等方面。电工所研制超导分离装置还完成了钢厂废水的磁分离净化试验。对于富含氧化铁杂质的钢厂废水，磁分离净化的效果很明显。

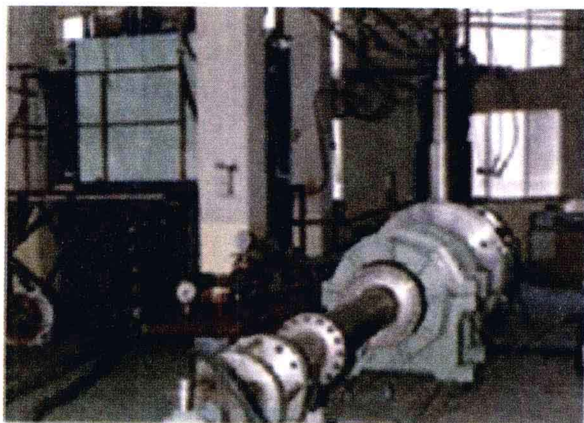


图20.2　抚顺隆基磁电设备有限公司生产的超导高梯度磁分离机



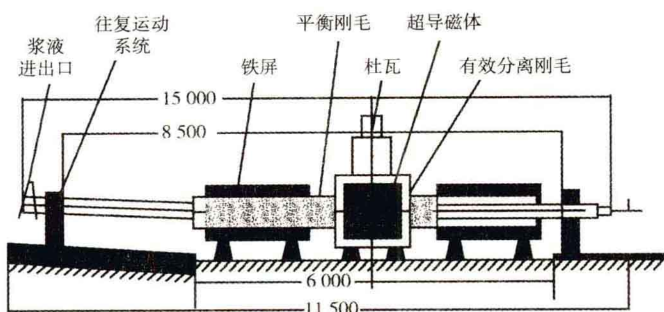


图20.3 抚顺隆基生产的超导高梯度磁分离机原理图

超导磁分离机的特点：一是具有不可比拟的低耗能特点，大大降低磁分离装置的运行成本；二是可以更有效地分离弱磁性和微细颗粒，有效扩大分离范围；三是处理能力大，占地面积小。

前捷克斯洛伐克的高岭土提纯超导磁分离装置已经在工厂中试运行。英国带有闭式循环制冷系统的超导磁分离装置已经商品化了。还有的国家在研究运用超导磁分离装置来提纯金刚石，进行煤的脱硫、污水处理等。

超导粒子探测器



图20.4 X光工业CT机

粒子探测器是核物理、粒子物理研究及辐射应用中不可缺少的工具和手段。当粒子和探测器内的物质相互作用而产生某种信息（如电、光脉冲或材料结构的变化），经放大后被记录、分析，以确定粒子的数目、位置、能量、动量、飞行时间、速度、质量等物理量。按照记录方式，粒子探测器可分为



计数器和径迹室两大类。

近年来人工放射性和粒子束流在工农医等方面的应用也离不开粒子探测技术和数据获取。如工业探伤、海关集装箱检测、石油探井、无接触测量（核子秤，测厚仪等）、食品保鲜、种子变异、用于诊断和治疗癌症的γ、X射线断层照相（CT）、正电子断层照相PET和γ刀、质子治癌等。高能物理中有电离室、泡室、闪烁计数器、契仑柯夫计数器、沟通辐射探测器等，不一而足。最早大规模使用超导技术并取得显著效益的是高能粒子探测器：超导氢泡室。

重庆大学的工业CT机是我国第一台工业CT机。在“神七”上天工程中立下汗马功劳。运载火箭的起爆器、点火器、连接螺栓等数百乃至上千件配件，都在这里进行了100％的无损检测，对工件进行全方位转动扫描，以确认它的质量是否符合要求（图20.5）。

上面介绍的超导探测器，都属于超导磁体在探测器中的运用。下面再介绍一种新的探测器：超导薄膜粒子探测器。

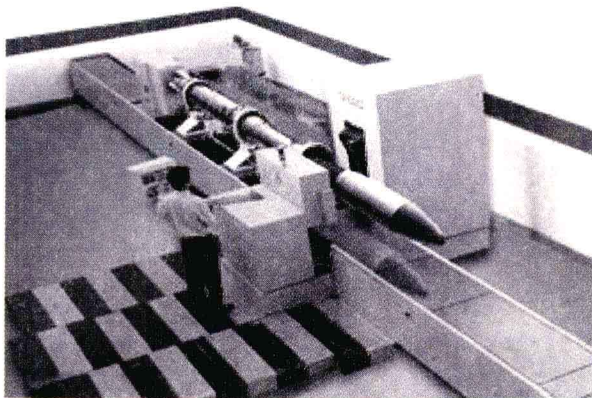


图20.5　我国第一台工业CT机：重庆大学工业CT机正在为“神七”火箭检测



我们利用图20.6来说明超导薄膜粒子探测器的原理。

超导薄膜在处于超导态时，通过的电流是均匀分布的。如果有一个粒子垂直于膜面打入并穿过薄膜，粒子必然会将一部分能量传给薄膜，于是围绕着入射点的半径为γ的柱体内获得了粒子传给的能量，温度升高，破坏了超导体，即柱体进入常态，有了电阻，电流在此处受阻，自然被迫从两边流过。这样，此柱体区和膜边缘之间的电流密度加大，见图20.6（a）。就是说，造成2γ长一段膜的整个断面进入常态，有了电阻，膜的两端就产生了电位差（图20.6（b））。

但是，整个膜处于低温系统之中，常态区会很快重新回到超导态。

到此，膜的这个断面就完成了一次“失超”的循环，并给出一个脉冲电压。这就是说，每得到一个脉冲电压，就有一个粒子入射进入。

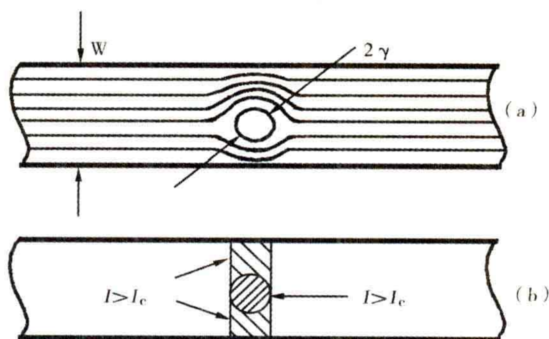


图20.6　超导薄膜探测器原理图

γ—失超薄膜柱体半径；
I–超导态电流密度；
I_c–失超态电流密度



超导薄膜粒子探测器具有位置分辨好、精度位置探测灵敏、能量分辨率高、运转阀低等优点，使它可以在许多精密测量中发挥特殊作用。目前，由于低温系统中液氦的价格昂贵，使其应用受到限制。随着高温超导体的出现，它一定会很快地进入广泛应用的领域。

超导的用途，还有超导磁体在科学仪器和实验室实验中的应用。在这方面的超导磁体，主要有高强度和高均匀度两大类。场强达到8万高斯的中小型超导磁体已经商品化了，在各国实验室中都有应用。最近，实验室内的超导磁体的场强已经达到18万~19万高斯了。例如：

核磁共振波谱仪中的超导磁体；

穆斯堡尔谱仪中的超导磁体；

天文望远镜中电子照相增强器中的超导磁体；

和水冷铜线组合产生高场强的稳态强磁场的超导磁体；

单晶体培育装置中的超导磁体；

……

超导材料应用可分为两大类，即强电应用和弱电应用。

强电应用包括稳定电网的设备，如超导限流器和变压器、磁体和储能系统、大电流输电，以及用于超导核磁成像、磁悬浮列车、超导电机、超导军用装备等。

弱电应用主要是微弱磁信号探测，可以探测到地磁场的亿分之一的信号强度，用于心磁和脑磁探测、大地探矿等，也可以制成滤波器等微波器件，用于通讯和国防。

超导的用途真是说不完。



超导既然有如此之多的用途，那就用呗，那就大力发展超导应用产品吧，怎么在实际的生产、生活之中很少见到应用超导技术呢？

确实，超导的应用现在还不广泛。原因是什么呢？

温度！

因为超导对温度的要求太苛刻了。早期应用的时候，是用液氦来降温，氦是一种稀有气体，而且很难液化，因而大大限制了超导的应用。后来新发现的液氮温区的超导材料，虽然大大提高了超导的应用范围，但是仍旧还是需要液氮。

同学们一定会想，能不能把超导的临界温度提高一些、再提高一些呢？能不能有液态空气温度下的超导材料呢？要是能够找到在室温下就能超导的材料就好了！

是啊！全世界的低温物理学家都在寻找高温超导材料！



21 寻找高温超导材料

寻找高温超导材料的最大障碍就是温度!

温度!低温物理学家们称作“温度壁垒”，就是说温度像墙壁、堡垒一样挡住了超导技术推广和实际应用的道路。

最初发现的超导，是在极低的温度下（4.16 K）实现的，温度一超过临界转变温度（或者超导起始转变温度），超导态就被破坏了。

现在，人们已经在好几千种材料中发现了超导现象，然而一直到1986年，已知超导体的最高临界温度才仅仅为23.2 K，更大多数超导体的临界温度比这个温度还要低得多，只有在液氦温区才具备超导性。

可是，氦，这个在太阳上取之不尽的元素，在地球上却十分稀缺，而且制备液氦的技术复杂，制冷效率低，生产成本相当高。这些问题严重地限制了超导技术的实际应用。

因此，探索具有更高临界温度的超导材料，就成了科学家们几十年来一直努力追求的目标。而发现临界温度在液氢温区（约20 K）、液氮温区（约77 K），甚至更高温区的超导体，则更是人们梦寐以求的目标。

试想一想，如果有那么一天，我们找到了在室温条件下的超



导材料，使用它就像今天使用铜导线一样方便，什么电动机、发动机的绕组啊，什么磁悬浮列车啊，什么零损耗输电啊，什么装电的匣子啊，岂不是都变得轻而易举了么？那将会给人类带来多么大的好处啊！

这么重大、美好、诱人的目标，几十年来吸引了一批又一批超导物理学家。他们苦苦地寻觅着，他们激动过、苦恼过，他们的成果在艰难地但也是欣喜地在接近这美好的目标。

首先，寻找新的高临界温度超导体的艰难在于缺少成熟理论的指导。因为人们关心，从理论的角度看，超导体的临界温度最高能达到多少度？就是说，临界温度的提高是否存在一个上限？如果有上限的话，应该是多少？应该朝什么方向努力、在哪些类型的材料中最有可能发现高临界温度的超导体？等等。

科学家们建立过理论，但理论的指导意义不大；提出过临界温度的上限，但很快又被推翻；到目前为止，超导领域里提出的微观理论还很难用来指导发现新的超导体。

正是因为缺少理论的指导，寻找高温超导体还是采用经验或半经验的方法，有人幽默地称这种方法是“炒菜式”的方法，菜淡了，就再多加一点盐；菜咸了，就赶紧再加一点菜。茫茫大千世界，高温超导体在哪里？这种探索工作是何等的艰难就可想而知了。

其次，探索工作的盲目性，使得探索工作的效果甚微。从1911年昂内斯发现超导电性时临界温度4.16 K算起，到1973年美国物理学家把临界温度提高到23.2 K，长达62年时间，仅仅提高了19 K。而且在探索中，往往一个疏忽或一点考虑不周，竟把





图21.1　K.A.缪勒（1927—）

假象当成果，不仅空欢喜一场而且白白浪费了精力。

还是在1941年时，德国物理学家贾斯蒂等人发现了一种较高临界温度的超导材料，在德国引起了轰动，一时认为可以很快将临界温度提高到室温。

几年之后，贾斯蒂心血来潮，在德国物理学会的会议上介绍自己的成果，并演示实验，果然得到了25 K的超导转变，观众报以掌声。这时低温物理学家门德尔松走上讲台，将实验用的杜瓦瓶摇晃了几下，超导电性便消失了……全场哑然，几年的心血付之东流。显然，贾斯蒂的错误在于他忘记了应该搅动液氢池以使温度均匀。

但是，困难和失败并没有吓倒低温物理学家们，在23.2 K的临界温度统治下沉默了13年之后，出现了令人喜悦的新突破。

1986年4月，设在瑞士苏黎世的IBM研究实验室的瑞士物理学家缪勒（图21.1）和他的学生、德国物理学家柏诺兹（图21.2）向德国的《物理学杂志》呈交的论文提出：钡镧铜氧化物中存在着33 K的高温超导电性，打开了寻找高温超导材料的新领域：从金属氧化物中去寻找。

1986年9月，缪勒和柏诺兹的上述论文正式发表；

1986年11月22日，日本学者首先证实了缪勒和柏诺兹33 K的结果；

1986年12月15日，华裔科学家、美国休斯敦大学朱经武教授把临界温度提高到40.2 K；



低温世界漫游

1986年12月26日，中国科学院物理研究所宣布获得了临界温度48.6 K的超导材料；



图21.2　柏诺森（1950—）

1987年来到了。全世界的科学家们，尤其是物理学家们，忘不了1987年的春天。

当时，他们几乎每天都被高温超导体的新记录所激动，一场席卷全球的具有重大突破意义的高温超导材料的研究竞赛正在激烈地展开。



图21.3　赵忠贤（1941—）

1987年2月15日，美国国家科学基金会宣布，华裔科学家、美国休斯敦大学教授朱经武和阿拉巴马大学教授吴茂昆获得了临界温度98 K的超导体。

2月24日，中国科学院宣布，物理研究所的赵忠贤等人获得了临界温度100 K的超导体（图21.3）；

3月6日，《人民日报》报道了北京大学在3月3日研制成零电阻温度92～93 K的超导材料；

3月9日，《人民日报》报道了日本科技厅金属材料技术研究所于3月3日至4日（几乎与北京大学同时但又是各自独立地）研制成零电阻温度92 K的超导材料；

3月10日，中国科技大学宣布制成了起始转变温度110 K的超导体；

3月12日，台湾工业技术研究院工业材料所在超导材料研究上获新成果；



3月16日，美国科学家发现超导材料结构，研制出极细微的超导薄膜；

3月17日，中国科学院物理所研制出零电阻温度20 K的钇系超导薄膜；

3月20日，中国科技大学在合肥又宣布获得了临界温度125 K的超导体；

3月29日，新华社纽约消息，报道了华裔科学家朱经武曾发现在240 K条件下的超导迹象；

4月3日，日本东京综合研究所研制成功超导线材；

……

这简直是一场惊心动魄、你追我赶的运动场上的角逐。仅仅3月份1个月，《人民日报》就有12天报道了有关超导的消息18条，涉及中国、日本、美国、法国以及台湾等国家及地区科学家们的研究成果。竞争之激烈，发展之快速，超导临界温度新记录的不断刷新，是超导研究领域中从来没有过的。人们按常规的老办法，把研究成果写成学术论文在学术期刊上发表，已远不能适

图21.4　1987年中国科技大学连续获得高温超导材料





应超导研究发展迅速的需要，因此通过报纸、电台或电视台等新闻媒介来发布成果，这在世界科学史上也是罕见的。

令人兴奋的是这场竞争并没有在1987年结束，而是一直持续到今天，并仍在持续。全世界几百个实验室投入到这场角逐之中，而且从科学家的“参赛”，转变为政府参赛，各国政府都予以高度重视，动用行政的手段，加大投资，投入大量的人力、物力进行研究，并纷纷建立了以优秀科技工作者为主体的超导攻关队伍。因此，研究成果仍旧不断地涌现出来。

自1987年以后，超导研究的主要成果有：

1988年，中国科技大学观察到了起始转变温度130 K的超导材料；

1990年，日本国立研究所的超导材料起始转变温度已达160 K；

1991年，许多国家学者相继宣布发现掺有碱金属的“碳足球”有超导电性；

1992年，北京国际高温超导会议召开，会议证实我国研制出含钽、铌元素氧化物的高温超导体；铊钡钙铜氧化物超导体的转变温度达127.5 K；同年，在美国休斯敦大学也召开了国际高温超导会议，交流超导新材料研究的进展；

1993年，瑞士学者希林等人合成了汞钡钙铜氧化物超导材料，把超导临界温度的记录提高到134 K；同年，日本国际超导中心将新记录刷新为150 K；

1994年，朱经武宣布创造了超导起始转变温度164 K的记录（图21.5）；





图21.5　朱经武教授（1941—）。美籍华人物理学家，原籍广东，台湾成功大学毕业，1979年出任休斯敦大学物理学教授，2001年7月1日起任香港科技大学校长。在高温超导领域取得重大突破，创造了目前公认的最高纪录：超导起始转变温度164 K，蜚声国际。

后来，法国国家科学研究中心则宣布研制成功超导起始转变温度250 K的氧化物超导材料。

2001年，平静几年的超导材料研究又获得了重要成果：

发现了新型高温超导材料二硼化镁；除了合金和陶瓷，目前已经在有机材料、碳60分子和一维碳纳米管中发现超导电性。

这些重大研究成果极大地鼓舞了科技界和产业界。我国超导临界温度已提高到零下120摄氏度即153 K左右。

至于临界温度更高的超导体，特别是室温超导体，是我们梦寐以求的。自1987年以后，经常有消息报道已获得接近室温的超导材料，但是材料性质极不稳定，也很难重复。因此还只能说是呈现了超导电性的迹象。

1987年的超导赛还给人以更为深刻的启示，人类应该在更加广泛的领域里寻找“高温超导体”。除了金属、金属氧化物之外，还可以考虑非金属、有机物，看看他们是否也具备“高温超导电性”。

于是，到2008年的时候，有媒体报道：铁能超导！水泥也能超导！

22 铁能超导，水泥也能超导

2008年12月29日，《科技日报》评选的“我国2008年十大科技新闻”中赫然列有一条：“我国科学家发现铁基高温超导材料”。

报道说：2008年3月25日，中国科技大学物理系陈仙辉教授的实验组宣布，首次在相关结构的氟掺杂的钐氧铁砷化合物中

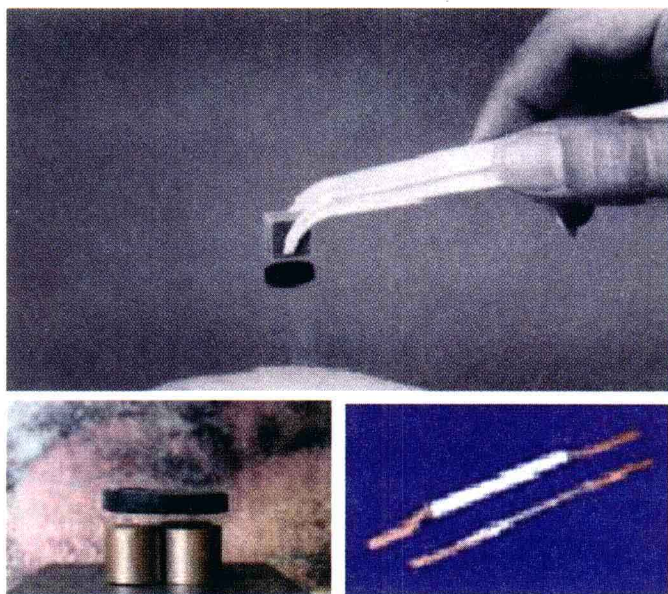


图22.1 新发现的铁基超导材料的完全抗磁性演示



发现了超导电性。之后其他几个中国研究小组陆续发现了更多的铁基超导材料。

2009年1月18日，由552名中国科学院院士和中国工程院院士投票评选的“2008年世界十大科技进展新闻”也在京揭晓。其中也有一条：“铁基超导材料研究获重大进展”，并刊登了如图22.1的照片。

世界著名的顶尖级学术性权威杂志《科学》对此评论说：“新发现的铁基高温超导材料将中国的凝聚态物理学家推向了最前沿”，“物理学界认为这是高温超导研究领域的一个重大进展”。

我们在上一节已经详细地介绍过，从1986年缪勒和柏诺兹发现新的高温超导材料——镧钡铜氧化物之后，那么多的科学家发现了一个又一个新的超导材料。可是，都还只是铜的氧化物，即铜基超导材料。

为什么一定要是铜基氧化物呢？时至今日，对于铜基超导材料的高温超导机制，物理学界仍未形成一致看法，这也使得高温超导成为当今凝聚态物理学中最大的谜团之一。因此，很多科学家都希望在铜基超导材料以外再找到新的高温超导材料，从而能够使高温超导机制更加明朗。

所以，从1987年开始的那场超导赛，至今还在继续。

2008年2月18日，东京工业大学细野秀雄教授等宣布，发现了含铁化合物（LAOFEAS）的超导状态。报告的最高临界温度为32 K。

3月14日，44岁的中科院物理所研究员闻海虎领导的小组，





图22.2 中国科技大学陈仙辉领导的科研小组报告氟掺杂钐氧铁砷化合物在临界温度43 K时也具有超导特性

将最新的研究成果：首个空穴掺杂铁基超导体论文投向了《欧洲物理快讯》。他们是在听到日本科学家发现铁基超导材料的消息后，第一时间开始了工作，几天后获得最初样品：锶掺杂镧氧铁砷化合物，超导临界温度为25 K。

3月25日，中国科技大学陈仙辉领导的科研小组又报告，氟掺杂钐氧铁砷化合物在临界温度43 K时具有超导特性。

3月28日，中国科学院物理所赵忠贤的科研小组报告，氟掺杂镨氧铁砷化合物的高温超导，临界温度可达52 K。

4月13日，赵忠贤小组又发现：氟掺杂钐氧铁砷化合物在压力环境下，其超导临界温度可进一步提升至55 K。

9月，国际超导领域研究主流杂志《超导科技》（Supercond. Sci. Technol.21）报道：中国科学院电工研究所马衍伟研究小组采用传统的粉末装管方法，首次成功研制出转变温度达25 K的铁基镧氧铁砷线材（图22.3）。

中国科学家的成果，不仅让世界欢呼雀跃，也让世界刮目相看（图22.4）。

《科学》杂志在评论这一事件时指出，新的研究成果不仅为科学家最终揭开超导的深层机制提供了新的条件和机遇，如洪流般的研究结果也让全世界看到了中国在凝聚态物理领域展现出的强大实力。美国佛罗里达大学的理论物理学家Peter



Hirschfeld说，“一个或许本不该让我惊讶的事实就是，出自北京的好论文的数量。他们的确已经扑到这项研究中来了。”

而在另一方面，中国的“海啸”，也让一些美国研究人员更加担心凝聚态物理在美国的“健康程度”。

斯坦福大学的理论物理学家Steven Kivelson说，“最引人注目的不仅仅是这些工作出自中国，而是它们并非出自美国。”Kivelson提到，美国国家研究委员会的一项报告已经警告说，资助的萧条已经让整个国家处于丧失掉凝聚态物理优势的危险之中。

不过，物理学家还是认为，现在就说明发现新材料的工作机制为时尚早。中科院物理所的王楠林说，“科学共同体必须首先积累更多的高质量样品数据。”同时，不必为这些样品和数据最先出自中国而感到惊讶。

由于已有的超导形成机制理论，并不能解释铜基氧化物超导材料的临界温度最高可达164 K的现象，因此，铁基超导材料的出现，首先是引起了超导专家们对超导机制研究的兴趣。中

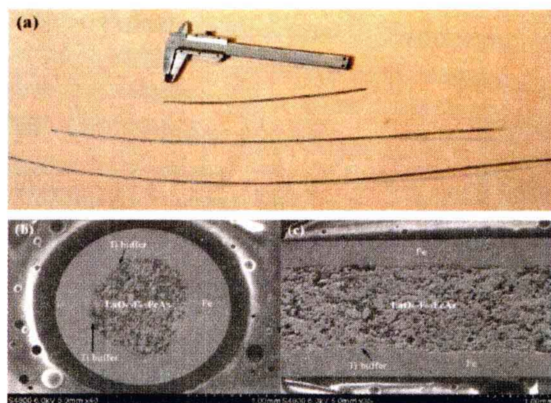
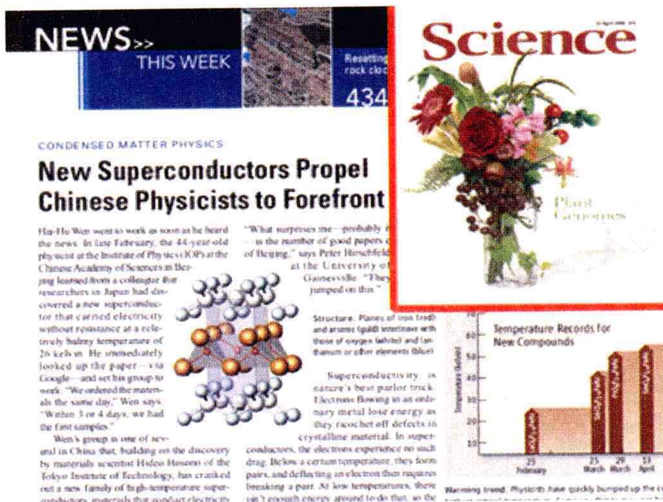


图22.3　中国科学院电工研究所用粉末装管方法研制的铁基新超导线材




NEWS>> THIS WEEK

Science

CONDENSED MATTER PHYSICS

New Superconductors Propel Chinese Physicists to Forefront

图22.4 2008年4月25日《科学》杂志封面及文章页
该杂志在凝聚态物理专栏以“新超导体将中国物理学家推到最前沿”为题
就中国物理学家在铁基新超导材料研究方面的重要贡献发表评述

日科学家新发现的这一系列铁基超导材料都具有相同的晶体结构。它们在有些方面与铜基超导材料惊人地相似。但是计算表明，这些铁基超导材料的晶格振动提供的电子对结合力量，不足以使材料超导临界温度达到如此高的水平。

因此，摆在物理学家面前的一个新问题是，新老两类材料的高温超导机制是否一样？诺贝尔奖获得者、美国普林斯顿大学理论物理学家菲利普·安德森说，假如不一样，那就意味着新材料的发现比预想的要重要得多，也许能从中发现全新的超导机制。闻海虎认为，新的铁基超导材料有可能会为探究高温超导机制提供一个更清晰的体系，在此基础上，铜基超导材料的高温超导机制“可能会一下子变清晰”。



但是，也有科学家持有异议。

美国斯坦福大学科学家史蒂夫·基沃尔森就认为，两类材料的晶体都是成面结构，都是从导电性能很差的材料转化而来，而且都表现出一种名为“反铁磁性”的磁特性。他说：“两者具有足够的相似性，因此可以假设，它们是本质相同的高温超导材料。”

不过，科学家们都认同一点，那就是新的铁基超导材料将激发物理学界新一轮的高温超导研究热。而下一步，科学家们将着眼于合成由单晶体构成的高品质铁基高温超导材料。

日本科学家在网上公布了由他们第一次发现的铁基超导材料的晶体结构图（图22.5）。此次发现的LaOFeAs是一种由绝缘的氧化镧层（LaO）和金属导电的砷铁（FeAs）层交错层叠而成、具有结晶构造的层状化合物。

通常情况下，这种物质，即使是低温状态也不会产生超导现象。不过，在将一部分氧离子（O）置换成氟离子（F）后，显现出了超导现象。具体地说，氟离子的置换量超过3％后即会显现出超导状态，在11％左右得到了32 K的最高临界温度。

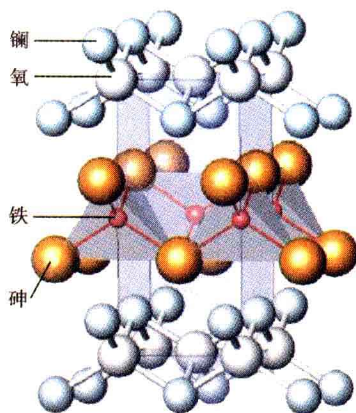


图22.5 铁基超导材料的晶体结构

回顾超导材料的发现历史，经历了三个阶段（图22.6）。首先是金属系材料，最高临界温度39 K，是二硼化



镁（MgB_2）。其次是铜基氧化物材料，Hg-Ba-Ca-Cu-O，在常压下临界温度达到了130 K，在高压下达到了160 K的最高临界温度。现在是铁基氧化物材料，最高临界温度是52 K。

不过，这个图上还没有画出“水泥”的位置。

水泥也超导?!

据日本媒体报道，由东京工业大学细野秀雄教授、河野公俊研究员等组成的研究小组发现，石灰与氧化铝组成的化合物$12CaO \cdot 7Al_2O_3$（$C_{12}A_7$）表现出超导特性。

众所周知，石灰（CaO）和氧化铝（Al_2O_3）为绝缘体。其复合氧化物$C_{12}A_7$也为绝缘体，通常作为氧化铝水泥的组成成分使用。

该研究小组此前曾经利用$C_{12}A_7$结晶，制成了在室温及大气中状态稳定的电子化合物（将电子作为负离子的化合物）。$C_{12}A_7$

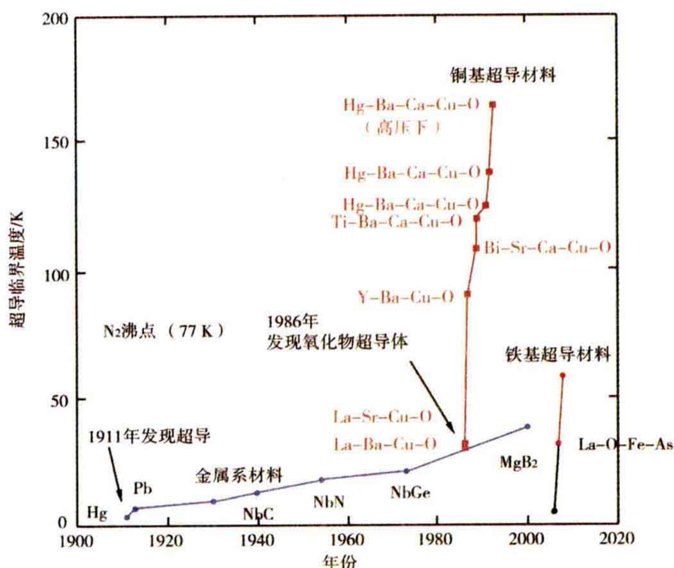


图22.6　超导材料临界温度的变化图



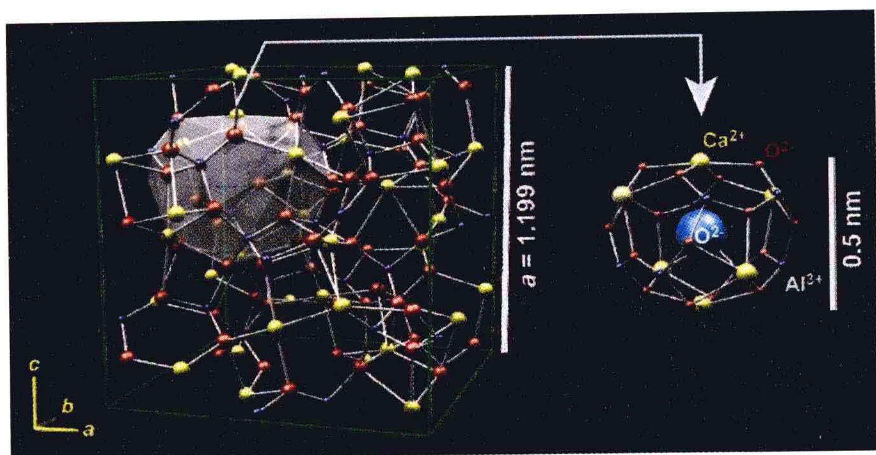


图22.7 C12A7的结晶结构
立方体为单位晶格，其中，12个笼中的2个包含氧离子

结晶的结构是在直径0.5纳米的笼（晶格间的空隙）中包合（不通过化学键将离子包裹在空隙中的结合方式）氧离子（O^{-2}）的纳米多孔结构。通过将该离子置换为电子，$C1_2A_7$结晶在接近室温的温度下表现出了金属的导电性。在约0.4 K的低温下，能够转变为电阻为0的超导状态。可见，此前被认为不导电的物质，通过利用纳米结构，也能成为超导体。

该发现是电子化合物首次被确认拥有超导特性的事例，新超导体的探索范围有望因此得到扩大，还可能为超导发生机理的研究赋予新的思路。

除了水泥是超导体，还有做铅笔的石墨，也是超导体。

石墨？那是碳？碳是超导体？

是啊，人们发现它比铁基超导材料还要早呢，它是：碳足球。

23 碳足球

用碳做的足球?

这足球确实是用碳做的，但它不是足球场上踢的球，是指碳的分子形状像个足球的样子。

通常，在中学教科书中介绍碳元素的时候，要讲到游离态的单质碳，主要有石墨、金刚石和无定形碳。

石墨的晶体结构是片状的，一层一层的、很软，很容易擦落，所以可用来作铅笔、眉笔等物品（图23.1）。

金刚石的晶体结构是正四面体的，结构非常牢固，因而十分坚硬，可以用来作手表轴承、玻璃刀等硬度要求高、耐磨损的器件（图23.2）。

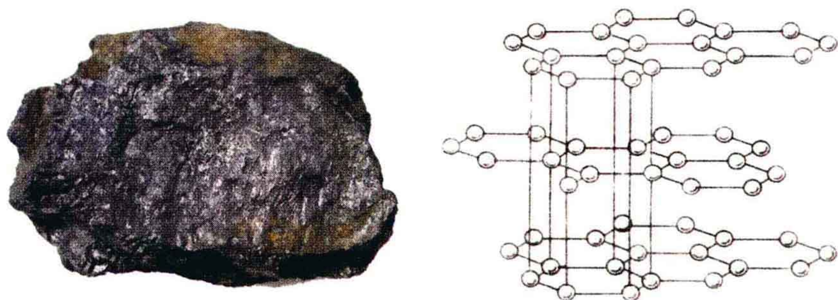


图23.1 石墨的实物（左）及其晶体结构图（右）





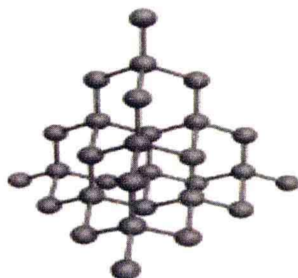


图23.2 世界上最大的金刚石：常林钻石钻石重158.786克拉，近似球体。1977年11月在山东临沭由农民魏振芳在田间发现。中国古代文献记载为“夜明珠”。右图为金刚石的晶体结构

确实，老师没有讲过晶体结构的形状像足球一样的碳。

然而，这是真的。你看图23.3的结构像不像个足球？它就是由60个碳原子组成的碳分子，是一个由12个正五边形和20个正六边形组成的32面体，形状酷似足球，是自然界最圆的分子，分子式：C_{60}。

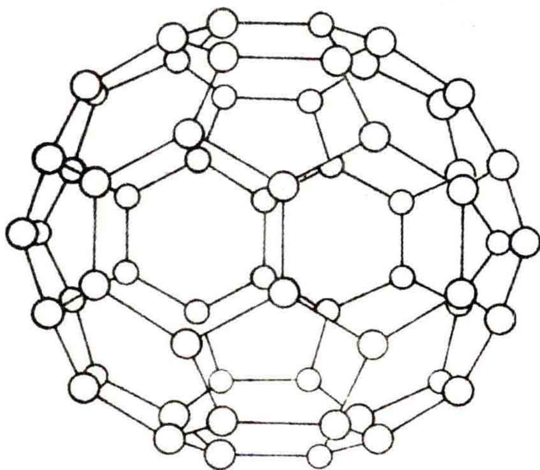
C_{60}和金刚石、石墨相比较，不只是分子结构上不同，还有一个特点不同。金刚石和石墨，作为材料二者性质完全不同，分子结构也不相同，但是两者有一点是相同的，那就是两者的分子都是以同样的结构方式向两端无限伸展的；而C_{60}则与它们两个都不一样，它的笼状结构32面体却是一个在空间中封闭的、有限的结构。

具有笼状结构的碳，还不止一个C_{60}，还有C_{28}、C_{32}、C_{70}、C_{84}、C_{90}……C_{240}。

它是一族全新的碳原子簇合物。

这种奇特碳单质，是1985年英国苏赛克斯大学的克罗托教授




图23.3　碳足球（C_{60}）

等人在合作进行宇宙尘埃模拟实验时发现的。当时，他们获得了以C_{60}为主的质谱图，并正式给出了球形的32面体分子结构。

他们说，由于受美国建筑设计师富勒设计的圆形穹顶结构的启发才构想出C_{60}的32面体结构，所以，他们把C_{60}这一族笼状碳原子簇合物命名为“富勒烯”。

C_{60}的发现是了不起的大事。

前中国科学院院长周光召教授说，碳足球的发现，“开辟了一个全新的领域”，“提供了广阔的应用前景”。

南京大学徐正教授说：“C_{60}的出现被认为是化学史上继高温超导体后最激动人心的事件。”“富勒烯打开了一条通向合成种类繁多的新化合物的道路，它的奇特性质也为材料科学等学科的发展开辟了广阔的前景。”其中，与我们这本书有关的，就是C_{60}为超导科学研究提供了一个寻找高温超导材料的新



领域，虽然它并不是超导专家为了寻找超导体时发现的。

因为，如今超导赛已深入科技界，一个新材料出现后，总要想到它是否具有超导性。早在1984年，法国科学家米歇尔等人就已制造出钡镧铜氧化物材料，对其电导率、碳化率、热电势等都作过系统的测量研究，就是没有再测一测80 K以下的导电性质，以致终生遗憾。

两年后，1986年4月，缪勒和柏诺兹制得了同样的钡镧铜氧化物材料，证明是临界温度33 K的超导体，导致超导研究的大突破，并因此获得了诺贝尔物理学奖。科学家们不会让米歇尔的遗憾重复出现。所以，C_{60}一问世，它的超导电性的研究也就开始了。

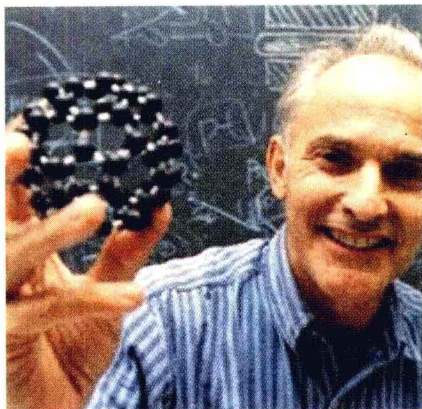


图23.4 发现C_{60}的英国苏赛克斯大学的克罗托教授

1991年，C_{60}的结构被证实一年多一点时，赫巴德一马当先，报道了掺钾C_{60}的超导临界温度为18 K。由于赫巴德曾在石墨中掺钾观察到超导电性，但临界温度只有0.55 K。如今同样的碳单质的C_{60}，掺的碱金属又都是钾，临界温度猛增到18 K，增加了30多倍，一下子激发了众多学者的兴趣，人们对C_{60}刮目相看。

接着，日本有人将C_{60}掺入铷，使超导临界温度提高到20 K；

美国哈佛大学有人将金属铷、钾掺入C_{60}，使超导临界温度提高到28 K；



日本有人研制了掺铯、掺铷的C_{60}，使超导临界温度提高到33 K；

最近又有报道，掺铷、掺铊的C_{60}、C_{70}材料，其超导临界温度已高达48 K了，进入到高温超导材料行列。

2000年曾有报道，美国科学家采用在C_{60}材料上放置了一个场效应晶体管，然后通过控制电流的新技术，使超导临界温度上升到52 K。

总之，人们从给C_{60}的超导研究中看到了C_{60}的美妙前景。

北京师范大学物理系孟宪仁教授在1993年3月撰文预言：“C_{60}有可能成为临界温度大于100 K的高温超导体。”

低温世界里，虽然目前发展最火红的是超导技术，但是低温世界的实际应用远不止这一项。因为低温本身就是可以为人类服务的手段，局部低温环境会给航天技术、遥感技术、冷冻保存、低温医学等许多方面带来革命性的变化。

下面，我们就来说说局部低温环境给低温医学带来的变化。

你看：在广州市复大肿瘤医院胸外科手术室里，无影灯下，一位肺癌患者俯伏在手术台上，清醒地看着面前的护士，不用

图23.5 克罗托教授所在的英国苏赛克斯大学





打麻醉药，手术就开始了，只见手术大夫将两根细细、长长的银针从背部刺了进去，在CT机屏幕上清晰地显示出银针进入的部位，不过一个小时，手术就结束了。

据统计，到2007年7月，这个医院采用这种方法来治疗的肿瘤患者，人数已经达到3 580人，居全国第一。

你知道这是怎样一种手术刀吗？人们都称它是氩氦超冷刀！



24 氩氦超冷刀

2007年11月，北京，第14届世界冷冻治疗大会开幕了。全世界的500多名学者、专家出席会议。来自美国、日本、法国的九位专家分别就冷冻治疗的历史、原理等作了报告。我国有关权威部门专家张积仁教授报告了我国肿瘤治疗的临床成就，他说，“到2007年7月为止，全国冷冻治疗13 500例，其中广州复大肿瘤医院3 580例，名列第一，第二名，1 500例……”随后，一位高高身材、稍显清瘦的中年专家走上讲台，开始了大会第一份专题临床报告，报告的题目是“肿瘤冷冻治疗：3 580例治疗成绩和经验”。报告者是牛立志博士，广州复大肿瘤医院副院长（图24.1）。



图24.1　广州复大肿瘤医院副院长牛立志博士在第14届世界冷冻治疗大会上第一个作专题临床报告



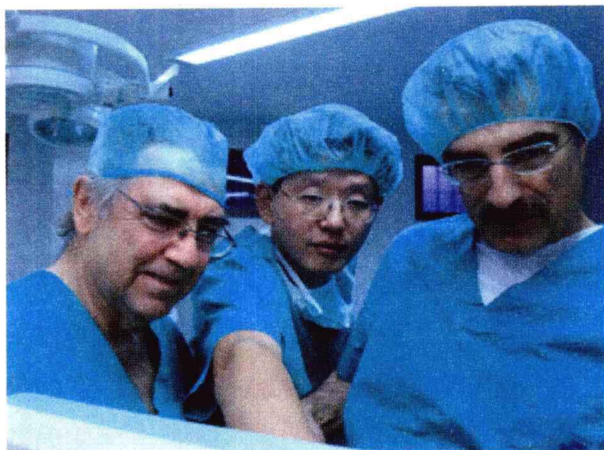


图24.2 牛立志博士（中）应邀赴意大利与国际冷冻学会主席弗朗科博士（右）、西班牙PEDRO医生（左）做冷冻治疗肿瘤的演示

他就是上文所说的广州复大肿瘤医院手术室里做手术的那个医生。全军肿瘤委员会主任委员张静仁教授说：“目前国内从事氩氦超冷刀治疗的医师主要有两个，一个在北京，一个就是广州的牛立志，而牛立志是全国最好的。”

2008年3月12日，牛立志博士应邀参加在雅加达举行的印度尼西亚全国肿瘤大会。会上，在国际冷冻治疗学会主席弗朗科陪同下，为一例肺癌患者作了CT引导下经皮冷冻的现场表演。当电视屏幕上实时显示，冷冻刀插入肿瘤内，冷冻区覆盖了全部肿瘤时，屏幕前数百名印度尼西亚的医生报以热烈的掌声和欢呼。

此后，应世界冷冻治疗学会主席弗朗科邀请，牛立志博士先后去意大利、西班牙四个城市作冷冻治疗肺癌、肝癌等肿瘤的学术报告，并参加了冷冻治疗肿瘤的现场表演（图24.2）。

那么，这种氩氦超冷刀为什么能治疗肿瘤呢？



原来它是利用冷冻对生物细胞的杀伤作用来进行治疗的。因为冷冻时，细胞中的水结成了冰，造成癌细胞液中各种溶质的浓度增大，从而产生对癌细胞的杀伤作用。如果是快速冷冻，冰晶就会在细胞核内形成和生长，冰的膨胀就会使细胞破裂。再采用复温溶解，细胞内外可能出现再结晶，从而提高了癌细胞液中各种溶质的毒性浓度，进一步产生对癌细胞的杀伤作用。

氩氦超冷刀也就是这个原理。根据焦耳-汤姆逊原理，也就是气体节流效应，即高压气体经管道的小孔突然释放，进入一较大空间，随着压力突然降低，会使局部温度迅速降低或升高。在氩氦超冷刀中，一般在数十秒内氩气可使针尖温度降至零下175摄氏度，氦气使温度升至零上45摄氏度。



氩氦刀的治疗原理是快速降温，细胞内和细胞外迅速结冰导致细胞破裂。同时小血管内形成冰晶，栓塞血管，导致肿瘤缺血坏死。

图24.3 美国恩多凯尔公司生产的氩氦超冷刀



目前，在国内使用的是由美国恩多凯尔公司（ENDOCARE）生产的最新一代氩氦刀系统（图24.3）。该系统在美国及欧洲许多国家已经作为实体肿瘤治疗常规方法来使用。

氩氦刀由三个部分组成，即冷-冻转换系统、温度监测系统和冷冻探针。

冷冻探针是中空密闭的针，最细的探针仅1.47毫米粗。探针内部有气体管道、温度传感器。

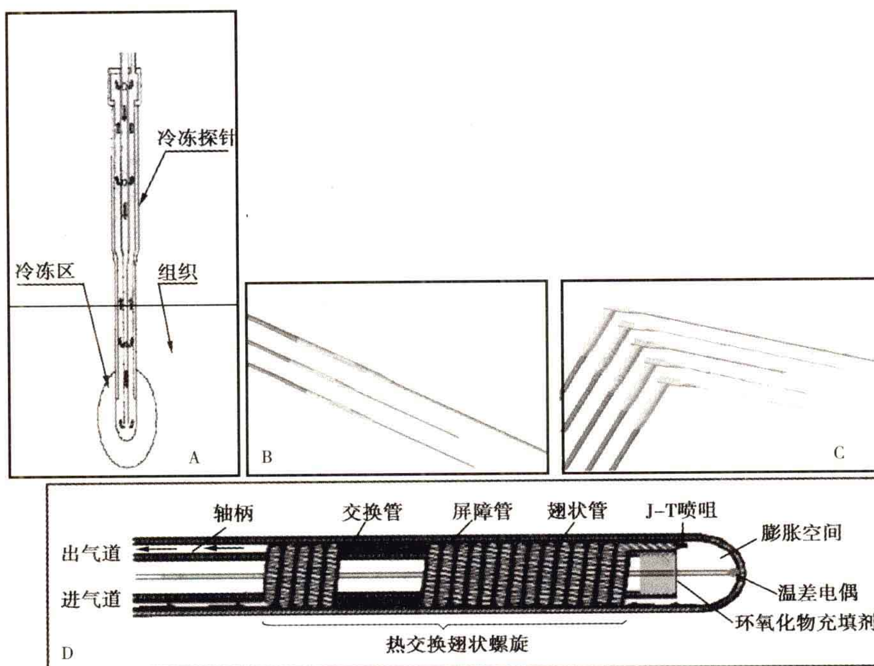


图24.4 氩氦冷冻探针的结构
A—冷冻探针的外观剖面图；B、C—不同规格的冷冻探针；
D—冷冻探针前端结构剖面



针内管道能承受3个氧气瓶的压力，由高科技的合金材料制作而成。探针有1.47毫米、2毫米、3毫米、5毫米等多种规格。1.47毫米穿刺针可以形成4厘米×6厘米大小的冰球，低于零下40摄氏度的冰球有1.5厘米×3.5厘米大小。只有低于零下40摄氏度的冰球才是有效治疗范围。其他规格的探针形成的冰球更大，有效治疗区域也就更大。

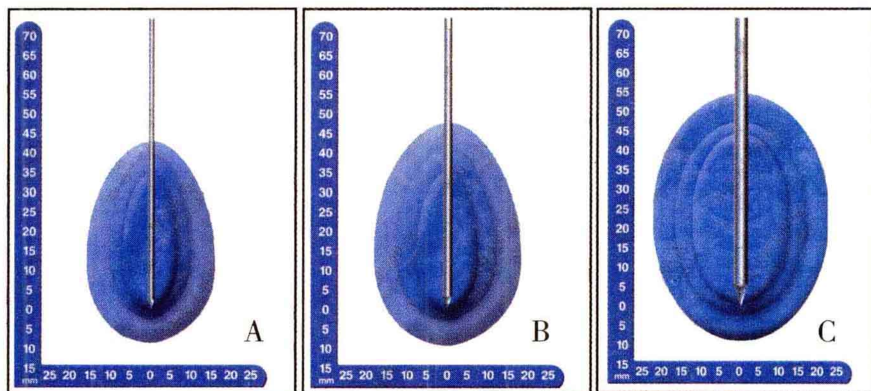


图24.5　不同直径的冷冻探针形成不同大小的冰球示意图
A—1.7毫米探针；B—2.4毫米探针；C—3.8毫米探针

手术时，将探针经皮穿刺，刺入肿瘤内，开通氩气，借氩气在刀尖急速膨胀产生制冷作用，在15秒内将病变组织冷冻至零下140～170摄氏度，持续15~20分钟。因为持续时间长短不同，所生成的冰球大小不同。冰球大小应该和肿瘤的大小相一致。所以，不同的肿瘤冷冻的时间不同。

冷冻出现冰球后，关闭氩气，停顿2分钟，再启动氦气，又借氦气在刀尖急速膨胀，急速加热处于超低温状态的病变组



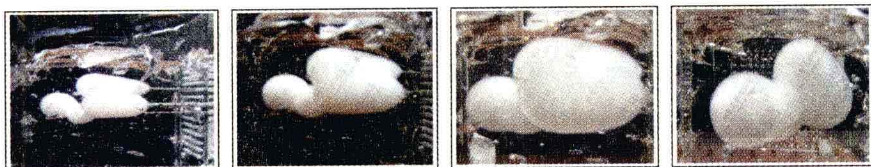


图24.6 直径1.5毫米冷冻探针冷冻不同时间形成的冰球示意图
A—冷冻5分钟后形成直径1.5厘米的冰球；B—8分钟后形成直径2.0厘米的冰球；
C—10分钟后形成直径3厘米的冰球；D—15分钟后形成冰球的直径3.5厘米

织，可使病变组织温度从零下140摄氏度上升至零上20～40摄氏度，从而施行快速热疗，持续3~5分钟。这样骤冷骤热地治疗再重复一次，治疗过程就结束了。

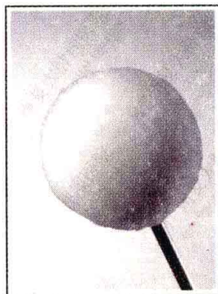


图24.7 氩氦冷超刀的冰球只结在探针的顶端

治疗时一般在B超、CT、磁共振引导下进行，配以三维超声成像定位系统进行实时三维立体定位，实时监测穿刺的全过程。

可以经皮穿刺，也可在外科手术直视下穿刺，还可以在腹腔镜、胸腔镜下穿刺。一般小肿瘤可以单针治疗，较大的肿瘤可以多针组合进行治疗，最多可以使用25根针进行组合。

此种冷热逆转疗法，对病变组织的摧毁尤为彻底。其降温及升温的速度、时间和温度，摧毁区域的尺寸与形状，可由B超或CT等实时监测，并由计算机精确设定和控制。其制冷或加热，只局限在刀尖端，刀杆保持常



温，刀杆不会对穿刺路径上的组织产生冷热伤害。探针内有温度传感器，可监测冷冻区域中心的温度，也可另外再刺入温度探针监控冷冻区边缘的温度，监测的温度在液晶显示屏显示为温度曲线，以便操作者及时了解冷冻过程。氩氦刀是目前唯一可进行微创经皮冷热治疗的仪器，安全性较高。

氩氦刀治疗作为一种物理治疗手段，不存在肿瘤抗药性和治疗不敏感的缺点；对于肿块巨大的患者可以多次反复治疗，并不会因复治而降低疗效。只要定位准确，手术的副作用及并发症很小；又因术中、术后无痛苦，术后仅需止血贴外敷，对于年老体弱及中晚期肿瘤体质状况较差的病人尤其适合。

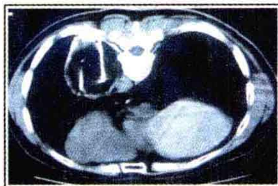
坏死的细胞碎片一般情况下会在3周左右被吸收。吸收后的灭活肿瘤组织，具有调控肿瘤抗原、激活肿瘤免疫反应的作用。

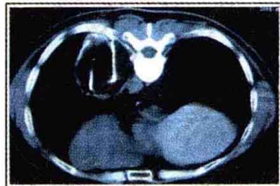
氩氦刀的适用症：1）肝癌、前列腺癌、肺癌等各种实体肿



图24.8　牛立志博士正在CT的引导下作肺癌经皮冷冻治疗（上）
A—冷冻探针从背部插入右肺瘤块内；
B—2根探针插入瘤块内；
C—冰球扩大，几乎覆盖整个瘤块









瘤；2）子宫肌瘤、前列腺增生、体表肿块等；3）各种实体肿瘤手术、放疗、化疗后复发或耐药的患者。

氩氦超冷刀的治疗原理属于“冷冻治疗”中的“冷冻杀伤”疗法。此外，还有“冷冻粘连”和“冷冻阻滞”疗法，由于本书篇幅有限，这里就不介绍了。

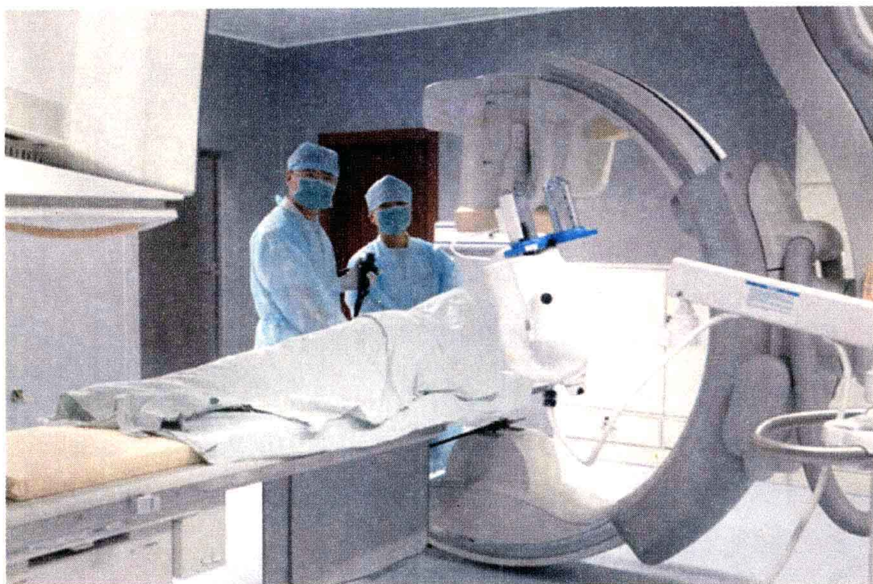


图24.9 中国人民解放军总医院第二附属医院（309医院）国际肿瘤治疗中心的氩氦超冷刀手术室



25 造冷的机器

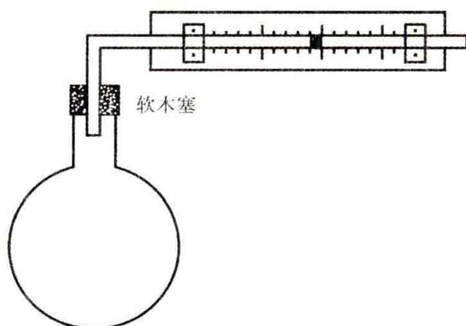


图25.1 气体膨胀时吸收热量的实验

造冷的机器就是“制冷机”，它是1895年由林德发明的。

我们在前面“液化氦的艰难历程”一节中曾提到：1895年，英国发明家汉普森和德国物理学家林德同时分别运用自制的“制冷机”液化空气成功，获得了80 K的低温，并证明可以进行工业化规模的大量生产。

这可是十分了不起的大事。因为人类再也不必依赖冬季的冰块，可以直接来生产“冷”了。人们习惯把林德发明的制冷机叫做“林德制冷机”。

林德是德国的科学家。他的制冷机首先把空气变成了“水”：液态空气。

这种机器是怎样进行工作的呢?

为了说清制冷机的工作原理，我们先作一个简单的实验。

如图25.1所示，把一根直角玻璃管穿过软木塞，插在大肚子烧瓶里。在水平方向上的玻璃管里预先装一小段红墨水水柱。



这时，烧瓶里的空气就被小水柱密封了，空气体积的变化可以从红色小水柱在玻璃管里的移动看出来。

当我们用双手紧紧握住烧瓶，不一会儿，就会看到红色小水柱在玻璃管里向玻璃管口这一边移动，在图25.1中就是向右移动。这说明烧瓶中的空气体积变大了。为什么？因为双手握住烧瓶时使烧瓶里的空气受热了。气体受热膨胀嘛。

既然如此，我们也可以说，气体在膨胀时要吸收热量。

我们知道，固体的形状、体积都是一定的，液体的形状虽然不定，但是体积是一定的。他们不受热，自己是不会膨胀的。气体就不同，即使不受热，只要盛放气体的容器变大了，气体就会自行膨胀，一直到充满整个容器的空间。那么，气体在自行膨胀时会不会吸收热量呢？

科学家们为此绞尽了脑汁。

还是在1845年，英国科学家焦耳（图25.3）就开始研究这个问题。他做了这样一个实验：

焦耳设计了一个如图25.2所示的容器。容器的A部分充满了被压缩的气体，B部分被抽气机抽得近乎真空，A和B相连接处用一个活门C隔开。整个容器都放在水中。

焦耳想，我只要打开活门C，A部分的气体就会发生膨胀，进入B部分，直到充满B、两边气体压强相等为止。膨胀如果是吸热的，就应该能够使水的温度降

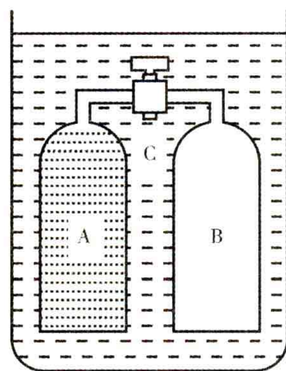


图25.2　焦耳的气体膨胀实验




图25.3　詹姆斯·焦耳（1818—1889）

低。于是，他在水中安放好了温度计，全神贯注地看着温度计，只等助手打开活门C。可是，焦耳很纳闷：助手打开活门C之后，温度计上的水银柱一动也没有动。他反复做了好多次，都是如此。

焦耳是一个科学家，科学家对科学的严谨态度促使他认真地分析水的温度没有变化的原因：是不是气体膨胀不需要吸收热量？不会吧？如果确实不会，那么是不是因为这个实验中气体膨胀需要的热量太少，不足以使水的温度有明显的下降，以致测量不出来。是不是气体膨胀时没有从水中吸收热量呢？是不是应该把温度计直接放到气体里面去呢？

焦耳和助手们想啊、做啊，做啊、想啊，直到7年后，1852

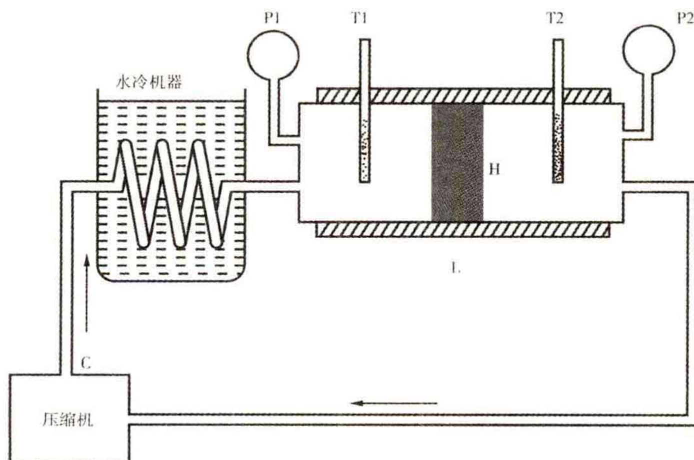


图25.4　焦耳-汤姆逊的“多孔塞实验”



年的一天，焦耳和另外一个科学家——英国的汤姆逊（又叫开尔文）一起设计了一个“多孔塞实验”，用棉花絮帮忙解决了这个问题。

图25.4就是焦耳和汤姆逊设计的实验装置。用一根管子L，对管壁进行了专门加工，绝热保温，外面的热量传不进去，里面的热量也散不出来。管子里有一个用棉花絮做的塞子H，固定在管子的中间。因为棉花絮上有许多孔，所以这种塞子又叫多孔塞。多孔塞的作用很特别，它可以让气体透过去，但又不是顺顺当当地流过去，而是对气流有一种阻滞、节制的作用，即“节流作用”。因此多孔塞两边总有一个压强差，使气体保持向一个方向流动。在多孔塞两边的管壁上，各装了一支温度计T_1、T_2和压力表P_1、P_2，可以直接看到多孔塞两边管内的温度和压强。

实验开始前，他们看到两边的压强和温度是相等的，即$T_1=T_2$、$P_1=P_2$。

实验开始后，他们先用空气压缩机C把高压空气从管子L的左端压进去。这时，左边的温度计T_1的指示值比压缩前略有上升，记下这时T_1和P_1的值。

虽然隔着L管的管壁看不到空气的流动，但是压缩后的空气肯定要膨胀，而且只能是经过多孔塞H向管子右边流去。按照当时理解，如果气体膨胀不会吸热，而管子L的绝热保温好，里面的热量不会散发出去，所以管子右边的T_2、P_2，应该与T_1、P_1继续保持相等。可是，他们惊喜地发现，T_2、P_2都比T_1、P_1要小。温度降低了，压强也减小了。

焦耳和汤姆逊抑制不住内心的激动，将实验重复了许多次，



结果都是一样的。他们会心地笑了。因为，他们明白，这个结果说明：气体作节流膨胀时，要吸收热量。如果绝热条件好，不能从外部吸收热量，就只好从自身吸热，也就是说自身的温度便要降低。

这就是著名的焦耳–汤姆逊实验。通过这个实验，他们找到了一个降温制冷的办法：绝热节流膨胀法。

不过，细心的同学们可能会问：在一开始，压缩气体的时候，温度为什么会升高呢？

这并不奇怪。用过打气筒的人都有体会，打气时还没有抽几下，气筒的下半截就会发热。是气筒活塞与气筒壁摩擦的原因吗？不是主要原因。不信，你把打气筒下端卸下来，再来回地拉活塞，就发现很难发热。气筒下端发热，是因为压缩空气时，空气要发热的缘故。由于打气时速度快，被压缩的空气所产生的热量在气筒内一下子散发不完，从而使气筒的下端温度升高。

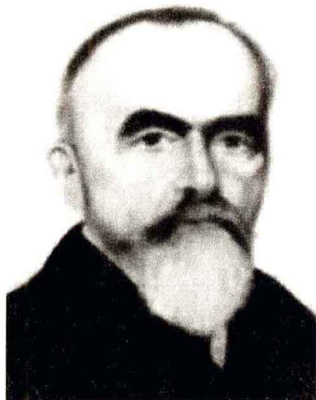


图25.5 卡尔·冯·林德（1842—1934）

但是，这确实还是一个棘手的问题：因为压缩气体时，温度T_1有所上升，就是说压缩气体时由于绝热条件好，压缩产生的热量散不出去，就升高了自身的温度。那么，为了降温，就要让气体膨胀；气体要能膨胀，就要先压缩；可是一压缩又要升温，岂不是互相矛盾么。

焦耳和汤姆逊为了解决这个问题，



就在实验装置中加了一个环节："水冷却器"（图25.4），这样压缩空气时升高的一点温度让水冷却器预冷降低了，再经节流膨胀就可以降温了。但是，这个方法效率太低，温度的降低也太少。他们对此一时还没有想出好办法。

不过，就是这个有缺陷的"多孔塞实验"，在43年之后，给了林德很大的启发，1872年林德发明了人类历史上第一台制冷机。

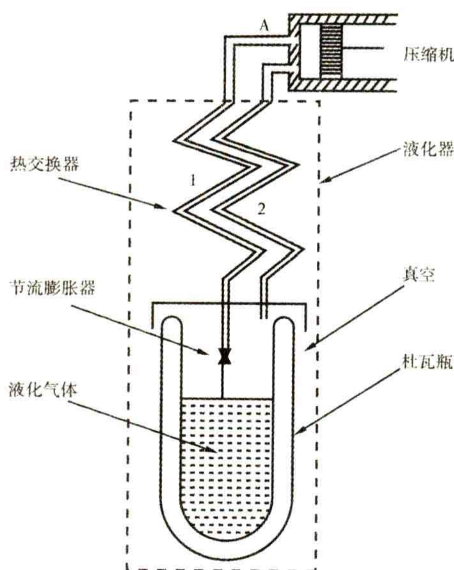


图25.6　林德制冷机原理图

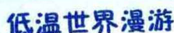
1895年，林德（图25.5）巧妙地运用焦耳—汤姆逊实验的原理，发明了结构简单、使用方便、可以连续生产的制冷机。

林德制冷机的诀窍在于：把焦耳-汤姆逊实验中的管子"拉长""扭弯"，设法让多孔塞式的节流膨胀过程反复进行。

图25.6就是林德制冷机的原理图。

在林德制冷机中，设置了一个节流膨胀器，相当于焦耳-汤姆逊实验中的多孔塞。从压缩机到节流膨胀器之间的部分，相当于焦耳-汤姆逊实验中多孔塞左边的管子，这"拉"得可长了。节流膨胀器下的部分，则相当于多孔塞右边的管子。

制冷机是这样工作的：经压缩机压缩的高压气体从A处流入



液化器，流入之前先经热交换器预冷，流入后经节流膨胀器进行膨胀，从而使气体温度有所降低。

液化器上的热交换器是一种最简单的热交换器，是由焊在一起的并排的两根铜管子“管1”和“管2”组成的。经膨胀而略有降温的气体由热交换器的管2流出杜瓦瓶返回压缩机；而从压缩机送出的经水冷却器预冷的高压气体由热交换器的管1流入液化器，这样流入的较高温度的气体和回流的较低温度的气体发生热交换，使流入的气体预冷降温。这时，再经节流膨胀器节流膨胀降温，就可使气体温度再有所降低。如此反复进行，气体的温度越来越低，直到被液化。



图25.7　卡皮查的氦液化机原理图

这种装置在低温部分没有机械移动的部件，因而也就没有机械的润滑问题。否则，低温条件下，各种润滑油都冻成了固体，机械移动起来自然有困难。



林德就利用这种制冷机首次进行了液态空气的工业化规模的生产。

后来，苏联科学家卡皮查把“节流膨胀降温法”和另一种降温法“绝热膨胀降温法”结合在一起，制成了“氦液化机”，终于使世界上最难液化的氦气也可以用机器生产液态氦了。

绝热膨胀法并不稀奇。它通过高压气体在绝热条件下对外界（如：活塞）做功，消耗自身能量，达到降低自身温度的目的。以绝热膨胀法制冷的机器叫做“膨胀机”。

图25.8就是氦液化机原理图。它是这样工作的：具有常温T_1和常压P_1的氦气通过活门进入压缩机，经绝热压缩从a至b处，压力增加至P_2，温度上升到T_2；由b通过水冷却器至c，温度恢复为常温T_1；氦气通过热交换器Ⅰ和液氮冷却器，从c至d，温度降为T_3，约77 K。

在d处，氦气分成两路，第一路进入膨胀机，具有压强P_2的氦气经绝热膨胀而降温为T_4，进入热交换器Ⅱ的外管以冷却内管的第二路氦气，然后经K管流回压缩机。

第二路氦气在热交换器Ⅱ降温到T_4，从d到e，再经热交换器Ⅲ降温到T_5，从e到f。T_5的温度已经相当低了，于是具有压强P_2的第二路氦气经节流膨胀阀作节流膨胀而降温到T_6，从f到g，有部分氦气液化，有一部分未液化的氦气回流通过热交换器Ⅲ的外管以冷却内管的气体，由i到j；然后再经热交换器Ⅱ的外管与第一路氦气会合，由j到k回到压缩机。这样循环不止就可获得很多的液态氦了。

氦是最后一个被液化的气体，它一旦液化了，大概到了冷的



26 液氦不是冷的尽头

液氦的温度是4.2 K，应该说是相当低了，但也确实不是冷的尽头。因为还有个绝对零度，“绝对”没有了温度，不是冷到尽头了么?

事情并不是这么简单。自从建立了绝对温标，有了绝对零度的概念之后，人们就千方百计地向绝对零度逼近。在前面我们已经叙述了这段历史，不过也只讲到昂内斯液化氦气成功，获得4 K左右的温度，再对氦进行固化虽然没有成功，但是获得了1.04 K的低温，就没有再往下说了。

那么，用什么办法可以获得比1.04 K还要低的温度呢?科学家们找啊，找啊，终于在初中物理课本上找到了一个办法，可以把液氦冷到1 K的温度。

这个办法叫蒸发降温法。每个人都可以做一个实验，用一点点棉花，蘸上一点酒精，放在室内温度计下端的球泡上，然后，轻轻对着棉花球上吹气，就可看到温度计的指示值下降很快。这说明酒精蒸发时吸收热量使温度下降了。

低温学家们根据这个原理，用加速蒸发液氦的办法继续降低液氦的温度。

本来，装在密闭容器里的液氦，自身会气化，氦蒸气越来越多，压力就会越来越大，大到一定的时候，氦蒸气中又会有



一些氦分子跑回到液氦中去。当从液氦中跑出来的氦分子和跑回去的氦分子数目相同时，蒸发就处于动态平衡，似乎是停止了。这个时候，如果有抽气机把氦蒸气迅速抽走，氦蒸气压力减少很多，液氦在低压下会沸腾起来，蒸发速度大大加快，从而需要吸收大量的热量。只要容器绝热效果好，阻止外界热量的渗入，液氦的蒸发可以使液氦冷到1 K。如果抽气机的抽运速度非常快，甚至可以使液氦冷到0.8 K。

此外，氦有两个同位素：氦3和氦4。氦3写成^{3}He，氦4写成^{4}He。氦Ⅰ、氦Ⅱ和它不是一回事，指的是不同温度下的液态氦。

^{3}He的沸点比^{4}He低，蒸气压却比^{4}He高出许多。比如：^{4}He在4.2 K时液化，^{3}He却要冷却到3.19 K才能液化；在0.5 K的温度下，^{3}He的蒸气压竟然是^{4}He的9 800倍。所以，利用这个特点，用抽气降压法，让^{3}He在低压下沸腾，就会比^{4}He蒸发得更快，从而使^{3}He冷到0.3 K。

我们知道，有的物质在溶解过程中会吸收热量。由于^{3}He在3.19 K时液化，那么如果把^{3}He溶解到^{4}He中去，不就可以得到比^{3}He更低的温度了吗？这种方法叫稀释制冷法。

运用稀释制冷法制造的稀释制冷机可以连续制冷获得0.01 K的低温。

但是，这还不是冷的尽头。

1956年，有人用绝热去磁法获得了0.000 01 K的温度。

绝热去磁法依据的是这样一个原理：有一类物体，叫“顺磁性固体”，或者简称为“顺磁体”。顺磁体如果处在和外界不交换热量的条件下，给它加上磁场，将它磁化，它的温度会升高；



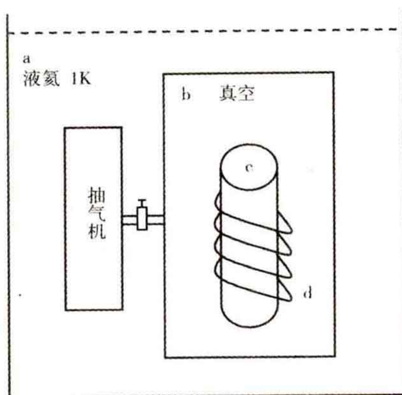


图26.1 绝热去磁法示意图

如果磁场逐渐减小，它的温度就会下降；如果磁场全部消失，它的温度下降得就更大。

根据这个原理，绝热去磁制冷装置的外面是一个大容器a，与外界绝热，里面盛着1 K的液氦。在液氦里又放着一个容器b。b是一个带着阀门和抽气机相连的容器，里面充满了低压氦气，放着我们要降温的顺磁体样品c。b的外面绕有线圈，接通电源后，线圈产生的磁场可以使顺磁体磁化。

做实验时，顺磁体c由于和低压氦气、容器b都浸在液氦里，故都保持着1 K左右的温度。设法使线圈感应出电流，产生磁场，顺磁体样品c被磁化，温度将要升高，但热量很快被液氦所吸收，因此磁化之后顺磁体仍旧保持1 K的低温。待c磁化后，抽去b中的低压氦气，容器里便为真空，顺磁体样品c就不会同b和液氦交换热量，即c处于绝热条件中。然后断开电路，消去磁场。磁场一消，c的温度就会降得很多。

1979年9月，意大利国际制冷大会宣布的0.000 000 05 K的低温，就是芬兰赫尔辛基技术大学低温实验室采用两级串联的绝热去磁法制冷，使铜的核自旋系统所达到的超低温记录。

1995年，科罗拉多大学和美国国家标准研究所的两位物理学家爱里克·科内尔和卡尔威曼成功地使一些铷原子达到了令人难以置信的温度，即达到了绝对零度之上的十亿分之二十度



（2×10^{-8} K）。他们利用激光束和“磁陷阱”系统使原子的运动变慢，来降低温度。

2008年1月有媒体报道，美国麻省理工学院的沃尔夫冈·凯特乐及其同事于2003年创下了吉尼斯世界纪录的最低温度纪录：绝对零度以上万亿分之810度(8.1×10^{-10} K)，还说，芬兰物理学家朱哈·托里尼米奇妙地控制了铑原子核，获得了绝对零度以上万亿分之180度的低温。这一温度虽然没有上吉尼斯世界纪录，但专家认为胜过了凯特乐的成绩。

不过，尽管小数点后边的零字越来越多，却始终没有达到绝对零度。方法想了一个又一个，仪器设备和实验方案越来越精密和周到，温度也越来越低，但是只要它不是绝对零度，就一定会有比它更低的温度，那么，它就还不是冷的尽头。

那么，究竟有没有绝对零度呢？至少在今天的科学知识范畴内是不可能的。

因为物体的温度实际上就是原子在物体内部的运动。当我们感到一个物体比较热的时候，就意味着它的原子在快速运动；当我们感到一个物体比较冷的时候，则意味着其内部的原子运动速度较慢。在常温下，气体的原子以每小时1 600千米的速度运动着，而在3 K的温度下则是以每小时1米的速度运动着，而在20 nK（2×10^{-8} K）的情况下，原子运动的速度虽然慢得难以测量，但是它仍旧在运动。

照这样推下去，也就是说，如果存在绝对零度，原子的运动应该就完全停止了，这恐怕是不可能的。

可是，还有人在网上说，数字有正负，电流有正负，凭什



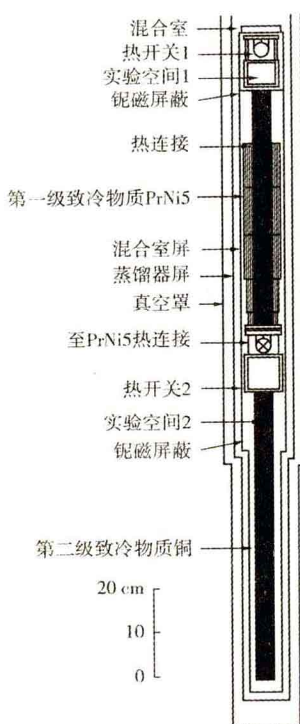


图26.2　两级绝热去磁极低温装置

么说就没有低于绝对零度的负温度？科学家们都没有否认有绝对零度时刻的存在，就是关于在时间起源之前的时空还认为存在可知性，凭什么断定在绝对零度之下的温度不存在？

其实，用不着这样钻牛角尖，绝对零度本身是一个极限概念。早在1906年，德国物理学家能斯脱就创立了热力学第三定律："不可能用有限的手段使一个物体冷却到绝对温度零度。"

啊！冷既有尽头，也没有尽头。

在科学家们一步一步向冷的尽头逼近的时候，同时还要解决两个问题：一个是超低温的维持，一个是超低温的测量。那么低的温度，怎样才能保持不变；那么低的温度，用什么温度计来测量，因为在那种低温条件下，除了氦之外，一切物质都成了固体，常见的液体温度计根本就不能用了。

那可怎么办？我说很简单，用气压计来测量低温！



27 用气压计测量低温

气压计，顾名思义，是测气体压强的，怎么能测量低温呢？

本来，温度这东西，既不是红的，也不是绿的；既不是方的，也不是圆的，看不见，摸不着。要测量它，只有寻找帮手。平常见到的家用温度计、体温计，都是水银温度计或酒精温度计，无非是利用水银或酒精，在温度变化时体积会敏感地发生变化的性质来测温的。

那么，在低温条件下，有没有性质敏感变化的物体呢？液体都变成固体了，是不行了。但是，在低温下仍旧能活动的气体，不是可以借来用吗？

不过，气体与液体不同，温度的变化会引起两个量的变化，既有体积的热胀或冷缩，又有压强的增大和减小。低温学家们早就研究了气体的温度、体积和压强之间的关系。

研究的结果是：对于一定质量的气体，如果保持压强不变，则气体的体积和温度成正比；如果保持体积不变，则气体的压强和温度成正比。

所以，用气体做成的温度计有两种：利用前一种性质，保持压强不变，以体积变化来测温的叫“定压气体温度计”；利用后一种性质，保持体积不变，以压强变化来测温的叫“定容气

体温度计”。在定容气体温度计中变化的是压强，当然要用气压计来测量了。可见，气压计在低温测量中能派上用场。

最简单的低温定容气体温度计，就是由测温泡B和气压计A组成（图27.1）。测温泡里充以氦气。氦气压强的大小用气压计来测量。

由于气压计的U形管中充的水银进入低温环境就会冻成固体，所以只能将气压计放在室温条件下，而用一根金属毛细管C把测温泡B和气压计A连接起来。

测温时，将B与被测物体相接触，由于温度变化，B内氦气的体积、压强都会变化。调整气压计U形管的右臂M′的高度，使U形管的左臂M中的水银面在不同的温度下始终固定在同一位置O处，以保证B和C中氦气的体积不变，这时B内气体的压强就可以从气压计U形管两臂中水银柱的高度差h和右臂M′上端的大气压来求得。显然，这个压强和这时的温度相对应。

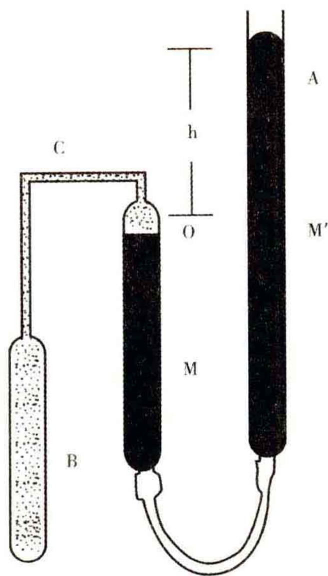


图27.1 低温定容气体温度计原理图

这样，不同的压强也就可以代表不同的温度。我们把不同压强相对应的温度标示在气压计刻度盘上，就可以从U形管水银柱的高度差h的数值直接读出所测物体的温度值了。

但是，在实际测量中，这种



温度计的误差较大。因此，要考虑到产生误差的原因，然后对结果进行修正。一般说来，这种温度计在经过修正后测量精度可达±0.005 K。这种温度计的缺点是不便携带。

于是，科学家们又想出了一个简便易带的方法。当然还是用气压计，不过用的不是液体性气压计，叫无液气压计。

无液气压计（图27.2）是用一种精密的弹簧来测量气压的，所以又叫弹簧气压计。

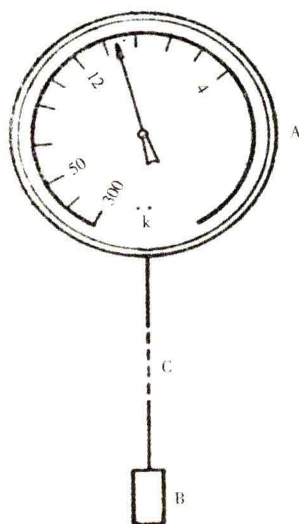


图27.2 最简单的无液气压计

这种新方法也是由三部分组成的：气压计A、测温泡B和连接A、B的金属毛细管C。普通的弹簧气压计的金属盒里是抽成真空的。改装成低温温度计后，和B，C相连，里面三者相通，充以氦气。测温时，由于B，C和A的金属管的体积是固定不变的，不同的温度使氦气的压强不同，压强值可以从气压计上直接读出。所以，我们可以根据压强和温度的对应关系，将气压计的刻度盘改成温度刻度盘，那样就可直接读出温度了。这种温度计测量精度是0.1 K左右。

还有一种办法，也是用气压计来测量，不过它测的是被测低温液体的蒸气压，所以又叫蒸气压温度计。因为低温液体的容器里，总是液、气共存的，总是不停地有液变成气，也有气变成液。当这两个方向的变化速度相等时，我们说它是处在热平衡状



态的饱和蒸气。饱和蒸气压和液体的温度是一一对应的，就是说每一个温度总有一个确定的饱和蒸气压相对应（表1、表2）。

当然，实际的数据还可以比表1列出更多些。表1的数据告诉我们，只要测出饱和蒸气压的值就可以知道液气共存体的温度。

表1　液态^{4}He的温度与饱和蒸气压的关系

温度（K）	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84
饱和蒸气压（mmHg）	11.445	13.187	15.147	17.348	19.811

表2　液态氦、液氧的温度与饱和蒸气压的关系

液氧温度（K）	85.29	84.89	84.48	84.06	83.62
液氮温度（K）	73.00	72.66	72.30	71.92	71.54
饱和蒸气压（mmHg）	440	420	400	380	360

这种温度计的装置也很简单。只要将盛有这种液体的测温泡放进被测低温物体所在的恒温器中或被测的低温液体中，并用管子（不是金属毛细管）连接到一个处在室温下的精密气压计上就可以了。测温泡里的液体在被测的低温条件下，很快形成该温度下的饱和蒸气，蒸气压的大小就在气压计上显示出来。

这种蒸气压温度计灵敏度极高，而且不需要进行校准、修正。不过，它也有缺点，那就是它只能在低温液体形成的那个范围内使用。例如，液态^{4}He，只能在1～4.2 K的范围内使用；超过4.2 K，就全部是氦气了，而不是^{4}He的液气共存的情况了。又



如，液态氧制作的蒸气压温度计只能在50~90 K之间使用。

金属气压计只能精确到0.1 K，水银气压计也只精确到0.005 K左右，那么前面说的那个0.000 000 05 K的温度是怎么测量出来的呢？

科学家们又去找磁来帮忙了。

磁是怎样测温的呢？

要明白磁怎样测温，先要明白什么叫磁化。

几乎所有的人都有这样的经验：用一块磁铁去吸起一根铁钉，这根铁钉的另一头又可吸起一根铁钉，以至可以连上四五根铁钉。铁钉之间原来是互不吸引的，为什么在磁铁下能相互吸引呢？

又如，拿来一根铁棒，让它去接触铁钉，并不能吸起铁钉。但是，在铁棒上绕上许多圈导线，通上电流，就发现这时的铁棒也能够吸引铁钉了。这又是为什么呢？

很明显，铁钉、铁棒原先都是没有磁性的，后来能吸引铁钉，说明它有了磁性。这磁性是怎么来的呢？这很明显，铁钉的磁性是磁铁的磁场给的，铁棒的磁性是通电线圈的电磁场给的。这种原来不显磁性的物体在磁场中产生了磁性的过程就叫做磁化。换句话说，上面讲到的铁钉或铁棒是被磁场磁化了。

为了说明不同的物体在磁场中被磁化的程度不同，科学家们给许多有关磁化的物理量下了定义，其中有一个物理量叫磁化率。磁化率和物体的温度有关系，所以被用来制作温度计了。

我们在上一节中曾经提到过，“绝热去磁”法中用的是一种“顺磁性物体”。这种顺磁体在磁场中被磁化时，磁化率和绝



对温度成反比。这是法国著名物理学家居里于1895年在实验中发现的，所以后来称这个关系叫居里定律。根据这个定律，只要能测到低温物体的磁化率，就可以算出这个低温物体的温度了。根据这个原理设计的温度计叫“磁温度计”。

最简单的磁温度计是由两个同轴线圈和一个电流表组成的。同轴线圈，就是这两个线圈的轴心在同一条直线上，一个线圈用来产生测量磁场，另一个线圈用来记录被测物体产生的磁场。这两个同轴线圈就好像气体温度计里的测量泡一样。测量时，把被测的低温物体放在线圈中央，让它处在线圈的包围之中，接通和关断产生磁场的那个线圈，被测物体就在这个磁场中被磁化了。磁化后被测物体产生的磁场会使另一个线圈产生感生电流。用电流表量出这个感生电流的大小，就可以推算出被测物体的磁化率。由于被测物体的温度不同，测出的磁化率的值也就不同。所以，知道了磁化率就可以推知被测物体的温度了。

不过，这种方法测出的温度还不是被测物体的正确值，还要通过实验来校正。那些在1K以下的超低温度都是用这种方法测定的。

这种磁温度计，不仅测量精度高，而且还有一个独特的优点，测量时用不着和被测物体直接接触。就是说，不直接接触被测物体就可以测出该物体的温度。因此，即使被测物体的形状很不规则也同样可以测量，只要把物体包围在线圈之中就可以了。

在低温温度计的家族中，远不止气体温度计和磁温度计两



种。还有利用金属和半导体的电阻随温度而变化的特性制成的电阻温度计，它可分为金属电阻温度计和半导体电阻温度计。还有利用温差电现象制成的温差电耦温度计。

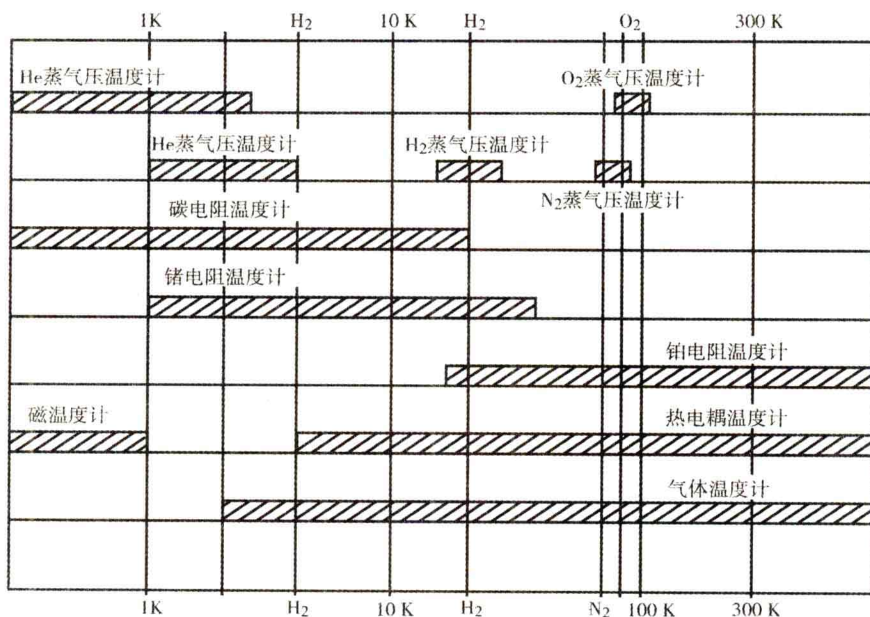


图27.3 低温温度计家族一览表



28 低温王国的边境

低温、超低温，确实是被人工造出来了，而且确确实实地被测量出来了，可是把它们放在哪里呢？找个普通的塑料桶显然是放不了液氮、液氦的。我们生活环境里的温度要比它们高出200多度，再多的液氮、液氦也蒸发得干干净净。就是放到冰天雪地的南极，那里的气温比起液氮、液氦也还是太高了。

怎么办?

怎样才能把已经获得的低温维持住呢?

要维持住低温，就要造一种容器，能够截断一切通入容器内的热的通路，热没有通路进去，容器内的低温自然不会升高了。

那么，热究竟是通过哪几条通路进入低温容器里的呢?

共有三条通路:

第一条叫“对流”。

热是可以通过液体和气体的流动来传递的。物体遇热膨胀、遇冷收缩是普遍的客观规律。放在炉子上的水壶，下部的水由于炉火，先被烧热，膨胀，比重就减小，就是说轻一点，于是就往上升，上部较冷的水，比重稍大，自然往下降，壶里的水就相对循环而流，使整个壶里的水都变热了。可见烧水时，热是通过壶里水的对流从下部传到上部去的。



气体也是这样。房间里的暖气片为什么要安装在离地面很近的地方，就是因为暖气片发出的热，使暖气片周围的空气变热，空气就膨胀，就变轻，就上升；房间内上部的空气较冷，稍重，下降，从而使室内空气发生对流，把热送遍全房间。如果暖气片放在上面，则室内上层空气热了，轻了，仍旧在上面；下层空气较冷、较重，更不会升上去；这就是说，形成不了对流。

要截断这一条通路倒也容易，那就是不让低温容器与液体或气体接触。比如，用双层结构做低温容器的器壁，将双层结构中间的空气抽去，成为真空。没有气体也就不会有气体的对流，热也就不会从这条路传入低温容器。

第二条通路叫“传导”。

热是可以通过物体从物体内部由一端传到另一端的。不锈钢勺刚刚放入热汤里，勺柄很快就十分烫手了。烧开水时，火在水壶下面烧，可是在上面的水壶提手却很烫。在这里，不锈钢汤勺也好，水壶提手也好，它们是固体，本身不会发生流动，但热确确实实地从一端到了另一端。

不过，并不是所有的材料都能很快地传热。例如，金属一类的物体，传热就很快，叫做“热的良导体”；而木头、陶瓷、玻璃、塑料等，传热就很差，要经过很长的时间，才能传输一点热量，叫做“热的不良导体”。还有羊毛、棉花、石棉、软木等材料，就几乎不能传送热量。

看来，要截断这一条通路也好办，低温容器的外壳选用的材料，不选“热的良导体”，只选“热的不良导体”。

第三条通路是“辐射”。




图28.1　詹姆斯·杜瓦
（1842–1923）

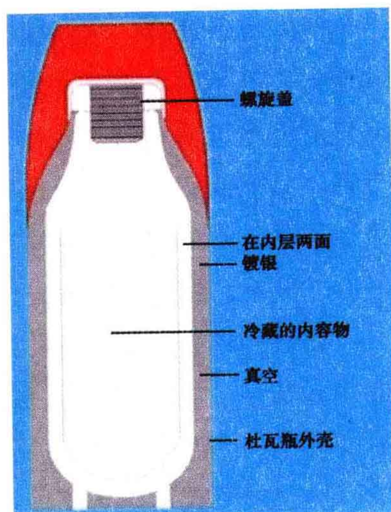


图28.2　杜瓦瓶的结构图

热可以不接触物体直接从高温物体向低温物体传递。比如，冬天坐在火炉边，你会感到很暖和，但这时人既未坐在火炉上，同火炉之间也没有什么东西相连接，就是说，既无对流也无传导，这热是怎么过来的呢？它是直接辐射过来的。

看起来，这条通路确实够厉害的，但是也好制服。热的辐射和光的辐射极其相似，从窗外照进的阳光用个平面镜就可以将它反射回去。热也是如此，只要有个反射面，辐射过来的热就会被反射回去。

这样，要截断这条通路的办法也就有了，就是用可以反射热的材料来做低温容器的器壁。

1895年，英国物理学家杜瓦（图28.1）在考虑了上述三个方面的问题之后，发明了一种瓶子，这种瓶子的四壁就符合上



面讲的三方面的要求。

这是一个双层的玻璃瓶（图28.2），内壁涂了薄薄一层金属银，两层间抽成真空。真空截断了热利用空气对流进入低温容器的通路；用玻璃，而不用铜、钢，截断了热利用“热的良导体”从内部传入低温容器的通路；涂银，成了镜面，就能把热反射回去，也就截断了热直接传入容器的通路。所以瓶内可以是一个比较安全的低温环境了。

因为这种瓶子是杜瓦发明的，大家都称它为“杜瓦瓶”。

家用的热水瓶，其前身就是杜瓦瓶，只是形状略有不同而已。不过，杜瓦当年发明它不是为了放热水、来防冷的，而是为



图28.3　早期的杜瓦瓶



浅底蝶形杜瓦瓶





桶状杜瓦瓶



平底杜瓦瓶

杜瓦储存运输罐

图28.4　几种不同样式的杜瓦瓶



了放冷“水”防热的，这冷“水”就是液态空气。

杜瓦的发明是了不起的。今天，低温容器越来越大，种类越来越多，结构越来越复杂，但是，基本的道理还是上述三条，主要部件还是杜瓦瓶，或是杜瓦瓶的变种。比如，大型低温容器多采用“多层绝热法”，就是由许多高真空夹层分开的，总要涂上高反射率的涂层，有时为了保证容器的强度，不得不用金属材料做器壁夹层，也要在两层之间用“热的不良导体”来支撑，不让内外金属层的金属之间直接相连。

但是，最伤脑筋的还是低温容器的开口。如，液氦的输入输出口，供电导线的出入口，测温用的引出口，是非开不可的。从这些口子渗进去的热是很可观的。因此，应设法使渗热降到最低程度。

比如，当通过引线向低温容器里面的装置供电时，这根导线是热的良导体，热可以从导线中传导进去；导线本身有电阻，通电后会发热。要加粗导线，可以减少电阻热，但又增加了热传导引起的漏热。换上更细的导线，虽然减少了热传导漏热，却又增加了电阻热。这就需要寻找一个粗细最合适的导线，就是选定一个热损耗最小的导线截面积。为了设计这个截面，要从供电的电流、导线两端的温差、导线的长度等许多方面来考虑。可见其不易啊！

说到这里，本书就要结束了。无论是奇妙的氦Ⅱ，还是神通广大的超导磁体，还是令人惊叹的氩氦超冷刀，都是在绝对零度附近产生的故事。这绝对零度附近的方方面面就构成了一个古老而又年轻的学科：低温学。



29 奔向低温学的未来

低温学是一门古老而又年轻的学科。它纵贯基础研究、应用研究的各个领域。在基础研究中占有独特的位置，又在发展现代尖端科学技术中具有重大意义，很有发展前途。

低温学的内容十分广泛，本书只是介绍了其中易于理解的一小部分内容。综合全部低温学，主要包括以下三个方面：

1．低温条件的获得、保持和测量。即：制冷学，恒温学，计温学。

2．低温下物质的各种性质，各种新现象、新效应和新的相互作用。如：超导电性，超流动性，完全抗磁性、低温下的比热和磁性，以及关于它们的理论：低温物理学。

3．低温及低温下物质的特性等在各种领域里的应用。如：超导电技术，即超导物理学；超导电工学；低温电子学（超导结电子学、超导晶体管理论）；低温生物学；低温医学等等。

回顾低温学的历史，早在1726年，古列热尔旅行记中就有低温的记载；

1875年出现了“制冷”一说；

1894—1895年，氧气、空气被液化，并应用于医疗中；

1898年，氢气被液化；



到了1908年，最后一种气种氦也被液化了；

及至1911年，发现了超导电性。

自此，超导理论的研究一直是低温学中低温物理学的最活跃、最富成效的领域。1962年约瑟夫森效应的预言被证实，以超导结电子学为主体的低温电子学迅速发展起来。

低温学不仅为尖端科学技术的发展作出了重大的贡献，而且同人民的生活有着密切的联系。没有制冷学，哪来今天千家万户的空调机、电冰箱呢？就不说其他应用了。

但是，低温学毕竟是一门年轻的科学。正如本书在前面多次提到过的，在许多方面还有没解决的课题。这些课题有待于同学们——未来的低温学家、低温物理学家去解决。

同学们，低温学是一个刚刚打开的宝库，里面到处都是宝贝，选择它作为你的奋斗目标吧，成功一定属于你们！

[General Information]
书名=低温世界漫游
作者=司有和编著
页数=226
SS号=12879182
DX号=
出版日期=2009.08
出版社=重庆大学出版社

28低温王国的边境
29奔向低温学的未来